



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

HANNA NURMILO
VETYPOLTTOKENNON HYÖDYNTÄMINEN LINJA-AUTOSSA

Diplomityö

Tarkastaja: Lehtori Risto Mikkonen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 6. huhtikuu-
ta 2016

TIIVISTELMÄ

HANNA NURMILO: Vetypolttokennon hyödyntäminen linja-autossa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 71 sivua

Kesäkuu 2016

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Vaihtoehtoiset sähköenergiateknologiat

Tarkastaja: Lehtori Risto Mikkonen

Avainsanat: Polttokennolinja-auto, kiinteä polymeeripolttokenno, vety, vedyn tankkaus

Liikenne on erittäin riippuvainen öljypohjaisista polttoaineista. Fossiilisena polttoaineena öljy aiheuttaa ympäristöongelmia ja sen saatavuus ja hinta ovat epävarmoja tulevaisuudessa. Vaihtoehtoisten liikennepolttoaineiden kehittäminen ja käytön edistäminen on tärkeää, jotta öljyriippuvuus pienenee. Vaihtoehtoisia liikennepolttoaineita ovat esimerkiksi sähkö, biopolttoaineet ja vety.

Tässä diplomityössä tarkastellaan vetykäyttöisten polttokennojen soveltuvuutta linja-autojen sähköenergian tuottajana. Vetykäyttöinen polttokenno on laite, joka muuttaa vedyn kemiallisen energian sähköenergiaksi. Sähköenergia voidaan käyttää linja-auton sähkömoottorissa. Polttokennon reaktiossa syntyy lämpöä ja vettä. Polttokennoista liikennekäyttöön soveltuu parhaiten kiinteä polymeerikeno lähinnä sen nopean käynnistyksen ja sopivan käyttölämpötilan takia. Polttokennot ovat osa polttokennojärjestelmää, johon kuuluu myös erilaisia apulaitteita. Polttokennojärjestelmän lisäksi vetytankki, energiavarasto ja sähkömoottori ovat polttokennolinja-auton keskeisiä komponentteja.

Vetykäyttöisten polttokennolinja-autojen käyttämisen edellytyksenä on vedyn saanti. Vety ei ole primäärienergianlähde, vaan vetyä täytyy valmistaa muista raaka-aineista. Vetyä voidaan valmistaa esimerkiksi hiilivedyistä tai vedestä. Vedyn valmistaminen kuluttaa aina energiaa. Kun vety valmistetaan fossiilisista polttoaineista, syntyy valmistuksesta hiilidioksidipäästöjä. Vedestä vetyä voidaan valmistaa sähköenergian avulla elektrolyysillä. Kun elektrolyysiin käytetty sähköenergia on tuotettu uusiutuvilla energialähteillä, vedyn valmistuksesta ei synny hiilidioksidipäästöjä. Vetyä syntyy myös kemianteollisuuden sivutuotteena.

Vedyn tankkausasema voi sijaita linja-autovarikolla. Varikolla vety voidaan tuottaa elektrolyysillä tai vetyä voidaan tuoda sinne suuremmasta tuotantolaitoksesta. Polttokennolinja-auton tankkaus kestää noin 10 minuuttia. Polttokennolinja-auton käyttöön ottaminen voi vaatia tiettyjä muutoksia varikolla, jotta vedyn käytöstä ei aiheudu vaaratilanteita. Myös henkilökunnan kouluttaminen uuteen teknologiaan on tärkeää.

ABSTRACT

HANNA NURMILO: Hydrogen Fuel Cells in Buses

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 71 pages

June 2016

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Alternative Electric Energy Technology

Examiner: Lecturer Risto Mikkonen

Keywords: Fuel Cell Bus, Proton Exchange Membrane Fuel Cell, Hydrogen, Hydrogen Refueling

Transportation depends highly on oil and oil products. The use of fossil fuels, such as oil, raises serious environmental problems. Oil will become scarcer and that will affect on oil prices. New technologies and alternative fuels need to be researched in order to lower the transport system's depend on oil. One of the new technologies is fuel cell vehicles.

This Master of Science Thesis focuses on hydrogen fuel cells for buses. Hydrogen fuel cell is a device that converts the chemical energy of hydrogen into electrical energy. Electrical energy can be used in electric motor of a bus. The proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) is the leading fuel cell type for automotive applications because it has the low operating temperature and fast start-up. A fuel cell system consists of auxiliary components and a fuel cell stack. Besides a fuel cell system, hydrogen storage tank, energy storage and electric motor are key components of fuel cell buses.

A widespread use of hydrogen vehicles requires efficient hydrogen production, transmission and distribution infrastructure. Hydrogen is a secondary energy carrier that can be produced from various sources for example from hydrocarbons or from water. Hydrogen production requires energy. Hydrogen production from fossil fuels is not a carbon free process. Hydrogen can be produced from renewably generated electrical power with electrolysis. Electrolysis can link renewably generated power to transport fuel markets. Hydrogen is also produced in chemical industry as a by-product.

Hydrogen can be produced on site at bus depot or trucked in. Fuel cell buses don't need wide hydrogen distribution network while they are refueled centralized on a depot. Fuel cell buses require approximately refueling time of 10 minutes and they need to be refueled only once per a day. Some changes must be done in a fuel cell bus workshop in order to ensure hydrogen safety. Sufficient staff training for a new technology is also very important.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknilliselle yliopistolle Sähkötekniikan laitokselle vaihtoehtoisten sähköenergiateknologioiden pääaineeseen. Työ on tehty kevään 2016 aikana. Diplomityön tekeminen oli mielenkiintoinen ja opettavainen projekti. Haluan kiittää lehtori Risto Mikkosta työni tarkastamisesta, ohjaamisesta ja kaikesta tuesta koko diplomityöprosessin aikana. Haluan kiittää myös vanhempiani opintojeni aikana saamasta tuesta ja kannustuksesta.

Tampereella 15.5.2016

Hanna Nurmilo

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	POLTTOKENNO	4
2.1	Yleinen teoria	4
2.2	Häviötyypit	6
2.3	Polttokennotyypit	10
2.4	PEM-kenno	14
2.5	Polttokennojärjestelmä	16
3.	POLTTOKENNOKÄYTTÖISET KULKUNEUVOT	19
3.1	Autot	19
3.2	Työkoneet	22
3.3	Merenkulun sovellukset	23
3.4	Muut liikenteen sovellukset	24
4.	LAIT, SÄÄDÖKSET JA STANDARDIT	25
4.1	Vedyn aineominaisuudet	25
4.2	Vetykäyttöisten moottoriajoneuvojen tyyppihyväksyntä	26
4.3	Palo- ja räjähdysvaaraan liittyviä säädöksiä	28
4.4	Painelaite- ja sähköturvallisuus	29
4.5	Polttokennoajoneuvoihin liittyviä standardeja ja ohjeita	29
5.	POLTTOKENNOLINJA-AUTO	33
5.1	Polttokennolinja-auton komponentit	33
5.1.1	Vetysäiliö	34
5.1.2	Polttokennosto ja apulaitteet	36
5.1.3	Energiavarasto	39
5.1.4	Sähkökäyttö	40
5.2	Polttokennolinja-autoprojekteja	41
5.2.1	Eurooppa	41
5.2.2	Pohjois-Amerikka ja Japani	43
5.3	Hinta	44
6.	VETY LIIKENTEEN POLTTOAINEENA	47
6.1	Vedyn tuotanto	47
6.2	Vedyn kuljetus	50
6.3	Vedyn tankkaus	51
6.4	Tankkausasemaverkosto	52
7.	POLTTOKENNOLINJA-AUTON HYÖDYNTÄMINEN TAMPEREELLA	54
7.1	Polttokennolinja-autoprojektin vaiheet	54
7.2	Vedyn tuotanto ja tankkaus	56
7.3	Tankkausaseman sijoitus	58
7.4	Varikko	60
8.	YHTEENVETO	61

LÄHTEET	64
---------------	----

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	Vaihtovirta englanniksi Alternating Current
AFC	Alkalipolttokenno englanniksi Alkaline Fuel Cell
AFCC	AFCC Automotive Fuel Cell Cooperation Corp., kaupallinen polttokennovalmistaja
APFCT	Asia Pacific Fuel Cell Technologies, taiwanilainen polttokennojen valmistaja
APU	Apuvoimalaite, englanniksi Auxiliary Power Unit
BoP	Polttokennojärjestelmän oheislaitteet englanniksi Balance of Plant
CEF	Connecting Europe Facility, EU-hanke
CHIC	Clean Hydrogen in European Cities -projekti
CHP	Sähkön ja lämmön yhteistuotanto englanniksi Combined Heat and Power
CUTE	The Clean Urban Transport for Europe -projekti
DC	Tasavirta englanniksi Direct Current
DMFC	Suora metanolipolttokenno englanniksi Direct Methanol Fuel Cell
DN	Putken halkaisija millimetreissä englanniksi Diameter Nominal
DNV	Det Norske Veritas, norjalainen riippumaton säätiö
DOE	Yhdysvaltojen energiaministeriö englanniksi U.S Department of Energy
DOT	The United States Department of Transportation (DOT)
EIGA	European Industrial Gas Association
F	Faradayn vakio eli 96 485 C/mol
FC	Polttokenno englanniksi Fuel Cell
FCH JU	Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking
FTA	Federal Transit Administration

HDW	Howaldtswerke-Deutsche Werft, saksalainen telakka
HHV	Ylempi lämpöarvo englanniksi Higher Heating Value
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
JHFC	Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project
KOH	Kaliumhydroksidi
Li-ion	Litiumioni
LoNo	Low or No Emission Vehicle Deployment Program eli Yhdysvaltojen liikenneministeriön ohjelma vähäpäästöisille busseille
MCFC	Sulakarbonaattikenno englanniksi Molten Carbonate Fuel Cell
MEA	Membraani-elektrodi-kokoonpano englanniksi Membrane Electrode Assembly
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry eli Japanin talous- ja teollisuusministeriö
NFCBP	National Fuel Cell Buss Program eli Yhdysvaltojen kansallinen polttokenobussiohjelma
NiMH	Nikkelimetallihydridi
p.a.	Vuosittain latinaksi per annum
PAFC	Fosforipolttokenno englanniksi Phosphoric Acid Fuel Cell
PEMFC	Proton exchange membrane fuel cell eli kiinteä polymeeripolttokenno
PFSA	Perfluorosulfonihappo englanniksi Perfluorosulfonic Acid
PSA	Paineenvaihteluadsorptio englanniksi Pressure swing adsorption
PTFE	Polytetrafluorietyleni
SFS	Suomen standardoimisliitto
SOFC	Kiinteäoksidipolttokenno englanniksi Solid Oxide Fuel Cell
TKL	Tampereen Kaupunkiliikenne Liikelaitos

UPS	Keskeytymätön virransyöttö englanniksi Uninterruptible Power Supply
A	Aktiivinen pinta-ala
C_B	Reaktantin massakonsentraatio
C_S	Reaktantin konsentraatio katalyytin pinnalla
D	Diffuusiokerroin
E_0	Reversiibeli tyhjäkäyntijännite
G_p	Lähtöaineiden Gibbsin energia
G_r	Reaktiotuotteiden Gibbsin energia
H	Entalpia
i	Virrantiheys
i_0	Siirtymävirrantiheys
i_l	Rajoittava virrantiheys
i_s	Sisäinen virrantiheys
N	Moolivirtaus
R	Yleinen kaasuvakio
r	Ominaisresistanssi
S	Entropia
T	Toimintalämpötila
V	Jännite
β	Varauksen siirtokerroin
δ	Diffuusiomatka
η	Hyötykerroin
η_e^{\max}	Teoreettinen maksimihyötysuhde

ΔG	Gibbsin vapaan energian muutos
ΔV	Kennojännitteen muutos
ΔV_a	Aktivointihäviöt
ΔV_{kon}	Konsentraatiohäviöt
ΔV_{Ω}	Ohmiset häviöt

1. JOHDANTO

Fossiiliset polttoaineet aiheuttavat kasvihuonepäästöjä, jotka kiihdyttävät ilmastonmuutosta. Erityisesti tiheään asutuilla alueilla fossiilisten polttoaineiden käyttö heikentää myös merkittävästi paikallista ilmanlaatua. Fossiilisten polttoaineiden ongelmana on ollut myös niiden saatavuus ja riittävyys. Fossiilisten polttoaineiden korvaajiksi on olemassa erilaisia vaihtoehtoisia polttoaineita. Liikenteessä vaihtoehtoisia polttoaineita ovat esimerkiksi vety ja biopolttoaineet.

Liikenne on erittäin riippuvainen öljystä ja öljytuotteista. Öljylähteet käyvät koko ajan niukemmiksi ja öljyä täytyy hankkia epävarmoista lähteistä. Öljyn hinnanvaihteluilla on suora vaikutus liikennekustannuksiin. Öljyn käytön takia liikenne on myös merkittävä kasvihuonekaasujen aiheuttaja. Euroopan unioni on asettanut tavoitteeksi vähentää kaikkia päästöjä 80–95 prosenttia vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050 mennessä. Liikenteen osalta vaaditaan vähintään 60 prosentin päästöjen vähennystä vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050 mennessä. [1]

Eurooppalainen autoteollisuus on pyrkinyt vähentämään päästöjä tehostamalla autojen toimintaa. Tämä tarkoittaa kevyempiä rakenteita, pienempää ilmanvastusta ja tehokkaita, mutta vähän polttoainetta kuluttavia moottoreita. Toinen tapa vähentää päästöjä on suosia hybridi- tai sähköajoneuvoja. Hybridiajoneuvolla tarkoitetaan ajoneuvoa, jossa on kaksi eri voimanlähdettä. Yleisin hybridiajoneuvotyyppi on sähkö- ja polttomoottorilla toimiva ajoneuvo. Polttokennoajoneuvot ovat myös usein hybridiajoneuvoja, koska niissä on polttokennon lisäksi sähköinen energiavarasto. Polttokennoajoneuvot ovat myös aina sähköajoneuvoja, koska ne toimivat sähkömoottorilla. Polttokennoajoneuvot voivat käyttää polttoaineenaan vetyä.

Vety on jaksollisen järjestelmän ensimmäinen ja kevyin alkuaine. Vety ei ole primäärienergianlähde, sillä sen valmistukseen tarvitaan energiaa. Vety on kuitenkin energian kantaja. Vedyn avulla energiaa voidaan siirtää, varastoida ja muuntaa haluttuun muotoon. Vetyä voidaan käyttää liikennepolttoaineen lisäksi uusiutuvan energian varastona. Tällöin esimerkiksi tuulella tai auringolla tuotettu ylimääräinen sähköenergia käytetään vedyn valmistamiseen vedestä. Kun sähköenergian kulutus on taas suurempi kuin tuotanto, vetyä voidaan käyttää polttokennossa sähköenergian tuottamiseksi. Vetyä on helppompaa varastoida kuin sähköenergiaa. Vetyä voidaan käyttää myös varavoimalaitteissa ja älykkäissä energiaverkoissa tasaamassa energiankulutuksen piikkejä. [2]

Vetyä voidaan käyttää liikenteen polttoaineena polttokennoajoneuvojen lisäksi myös polttomoottoriajoneuvoissa. Vetykäyttöisissä polttomoottoriajoneuvoissa poltetaan ben-

siinin sijasta vetyä ja ne eroavatkin toiminnaltaan hyvin vähän tavanomaisista polttomootoriajoneuvoista. Vetykäyttöisten ajoneuvojen pakokaasuna on kuitenkin lähes puhdasta vesihöyryä. Vetykäyttöisiä polttomootoriajoneuvokokeiluja on ollut suurista autovalmistajista BMW:llä, Fordilla ja Mazdalla. Autoteollisuudella on kuitenkin ollut vetyajoneuvoista suurempi kiinnostus polttokennoajoneuvoja kohtaan lähinnä polttokennojen tarjoaman paremman hyötysuhteen takia. [2]

Uuden polttoaineen käyttöönoton hankaluutena on riittävän jakeluverkoston luominen. Jakeluinfradirektiivi (2014/94/EU) velvoittaa Euroopan unionin jäsenmaita laatimaan toimintakehyksen liikenteen vaihtoehtoisten polttoaineiden markkinoiden kehittämiseen ja infrastruktuurin luomiseen. Direktiivi määrittelee liikenteen vaihtoehtoisiksi polttoaineiksi sähkön, vedyn, biopolttoaineet, synteettiset polttoaineet, maakaasun ja nestekaasun. Jos jäsenvaltio sisällyttää julkisia vetytankkauspisteitä toimintakehykseensä, niiden täytyy muodostaa viimeistään vuoden 2025 loppuun mennessä riittävä maanlaajuinen verkosto. [3]

Jakeluinfradirektiivin velvoittamana Suomen liikenne- ja viestintäministeriö on laatinut toukokuussa 2015 ehdotuksen kansallisen toimintakehyksen vaihtoehtoisten polttoaineiden markkinoiden kehittämiseksi. Toimintakehitykseen on sisällytetty vaihtoehtoisista liikennepolttoaineista sähkö, nestemäiset biopolttoaineet, maa- ja biokaasu sekä vety. Ehdotuksessa hahmotellaan Suomen tulevaa vetytankkausverkostoa. Alkuvaiheessa uudet tankkausasemat pyritään sijoittamaan suurimpiin kaupunkeihin. [4]

Maan laajuisen tankkausasemaverkoston puuttuessa uudet polttoaineet on helpointa ottaa käyttöön sellaisille ajoneuvoille, joiden polttoaineenjaku on järjestetty keskitysti. Tällaisia ajoneuvoja ovat esimerkiksi kaupunkilinja-autot, taksit ja erilaiset työkooneet. Sähkö- ja vetytekniikan hyödyntäminen kaupunkiajoneuvoissa vähentää paikallisten ilmansaasteiden lisäksi myös meluhaittoja. Joukkoliikenteen kulkuneuvoja voidaan käyttää testialustoina ja ne lisäävät ihmisten tietoisuutta vaihtoehtoisista käyttövoimajärjestelmistä ja polttoaineista. Joukkoliikenne edistää myös infrastruktuurin rakentamista ja nopeuttaa uusien teknologioiden kaupallistumista.

Tässä diplomityössä tarkastellaan, mikä on polttokennolinja-autojen nykytilanne ja mitä vaatimuksia polttokennolinja-auton käyttöönottoon liittyy. Vetykäyttöisten polttokennolinja-autojen vaatimaa teknologiaa ja lainsäädäntöä tarkastellaan yleisellä tasolla. Diplomityössä on myös pohdittu, miten Tampereella voitaisiin toteuttaa polttokennolinja-autoprojekti ja miten auton tankkaus voitaisiin toteuttaa.

Luvussa 2 käsitellään polttokennojen yleistä teoriaa ja toimintaa. Luvussa käydään läpi eri polttokennotyypit, joista tarkemmin tarkastellaan kiinteää polymeeripoltttokennoa sekä sen tarvitsemaa polttokennojärjestelmää. Luvussa 3 käydään läpi erilaisia polttokennokulkuneuvoja ja niiden käytön nykytilannetta. Luvussa 4 käydään läpi vedyn ai-neominaisuuksia turvallisuuden kannalta. Luvussa esitellään myös tärkeimmät laitteet ja

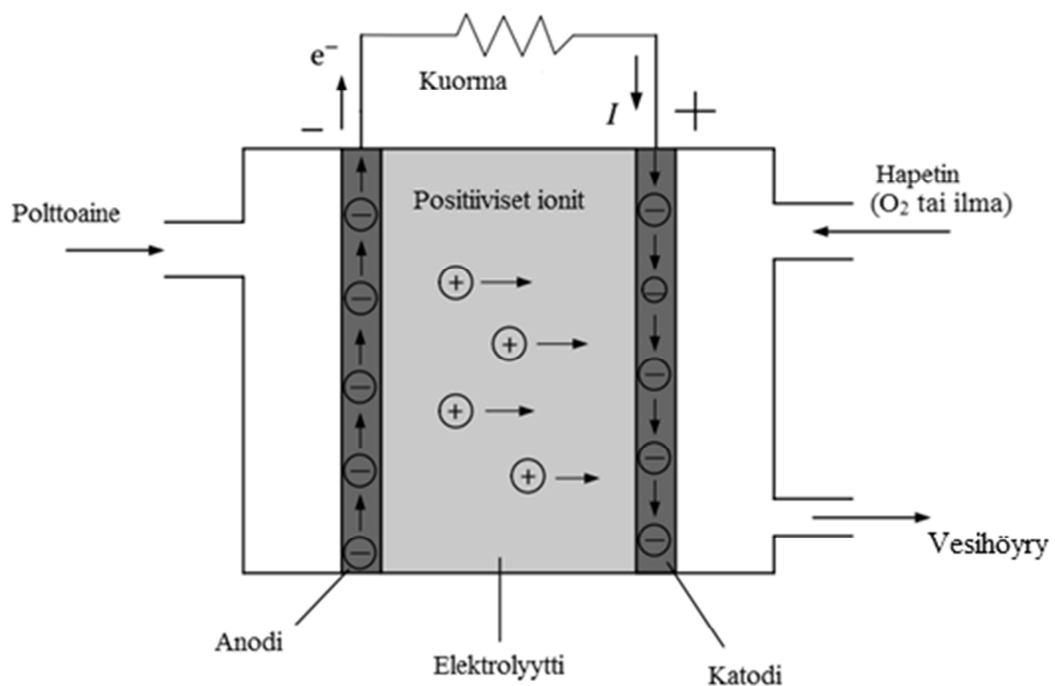
säädökset, jotka liittyvät polttokennoajoneuvoihin sekä niiden tankkaukseen. Lisäksi luvussa esitellään standardeja, joita täytyy ottaa huomioon polttokennoajoneuvojen ja tankkauksen osalta. Luvussa 5 käsitellään tarkemmin polttokennolinja-autoa. Luvussa käydään läpi polttokennolinja-auton keskeisimmät komponentit. Luvussa käydään läpi polttokennolinja-autojen nykytilannetta sekä niiden hintakehitystä ja kannattavuuteen liittyviä tekijöitä. Luvussa 6 kerrotaan vedyn eri tuotanto- ja kuljetustavoista. Lisäksi luvussa käsitellään vedyn tankkausta. Luvussa 7 käsitellään vetykäyttöisen polttokennolinja-auton soveltuvuutta Tampereelle. Luvussa käsitellään polttokennolinja-auton käyttöönottoon liittyviä vaiheita. Luvussa pohditaan Tampereelle sopivinta vedyn tuotantotapaa, tankkauspisteen sijaintia sekä polttokennolinja-autolle soveltuvan varikon vaatimuksia.

2. POLTTOKENNO

Polttokenno on sähkökemiallinen laite, joka muuttaa polttoaineen ja hapettimen kemiallisen energian sähköenergiaksi. Polttokenno koostuu anodista, katodista ja niiden välissä olevasta elektrolyytistä. Polttokennoja käytetään usein samanlaisissa sovelluksissa kuin akkuja. Polttokennon ero akkuihin on se, että polttokenno tuottaa sähköä teoriassa niin kauan kuin siihen syötetään polttoaineita. Akut taas ovat energiavarastoja, joiden sähköntuotanto riippuu niihin ladatuista reagoivien aineiden määrästä. Kun reaktioaineet on käytetty loppuun, akku on ladattava ulkoisen lähteen kautta uudestaan.

2.1 Yleinen teoria

Kuvassa 2.1 on esitetty polttokennon perustoimintaperiaate. Polttokennojen polttoaine syötetään anodille, jossa se hajoaa positiivisiksi ioneiksi ja elektroneiksi. Positiiviset ionit kulkevat elektrolyytin kautta katodille, missä ne reagoivat katodille syötetyn hapettimen ja ulkoisen kuorman kautta kulkeutuneiden elektronien kanssa. Jos polttoaineena käytetään vetyä, reaktiossa syntyy vettä.



Kuva 2.1 Polttokennon periaatekuva [5]

Kiinteillä polymeerikennoilla (Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) polttoaineena käytetty vety muodostaa anodilla H⁺-ioneja ja elektroneja. Anodin reaktio on



Katodilla happi reagoi vetyionien ja elektronien kanssa. Katodin reaktio on



Katodilla tapahtuvasta reaktiosta vapautuu lämpöä. Reaktioyhtälöistä (2.1) ja (2.2) saadaan kennon kokonaisreaktioksi



Polttokennon elektrodeilla tapahtuvat reaktiot riippuvat kennotyypistä sekä käytetyistä polttoaineista. Vetykäyttöisten kennojen kokonaisreaktio on aina reaktion (2.3) mukainen.

Polttokennossa tapahtuvasta kemiallisesta reaktiosta saatava sähköenergia on enintään Gibbsin vapaan energian muutoksen suuruinen. Gibbsin vapaan energian muutos, ΔG , on lähtöaineiden ja reaktiotuotteiden Gibbsin energian erotus eli [5, s.433]

$$\Delta G = \Delta G_p - \Delta G_r, \quad (2.4)$$

missä ΔG_p on lähtöaineiden ja ΔG_r reaktiotuotteiden Gibbsin energia. Gibbsin vapaa energia on suurin mahdollinen työ tai polttokennon tapauksessa sähköenergia, joka voidaan prosessissa saavuttaa. Gibbsin energian muutos voidaan lausua myös entalpian H ja entropian S avulla

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (2.5)$$

missä T on toimintalämpötila. Häviöttömässä eli reversiibelissä tilanteessa koko Gibbsin vapaan energian muutos muuttuu sähköenergiaksi. Tällöin

$$\Delta G = -nFE_0, \quad (2.6)$$

missä n on reaktiossa siirtyvien elektronien määrä polttoainemolekyyliä kohti, F on Faradayn vakio eli 96 485 C/mol ja E_0 polttokennon reversiibeli tyhjäkäyntijännite. Yhtälöstä (2.6) saadaan polttokennon reversiibeliksi tyhjäkäyntijännitteeksi

$$E_0 = -\frac{\Delta G}{nF} \quad (2.7)$$

Standardiolosuhteissa eli 25 °C lämpötilassa ja 101,325 kPa paineessa reaktiosta (2.3) syntyvä Gibbsin vapaan energian muutos on -237,13 kJ/mol [6], jolloin polttokennon reversiibeli tyhjäkäyntijännite on E_0

$$E_0 = \frac{237,13 \text{ kJ/mol}}{2 \cdot 96485 \text{ C/mol}} \approx 1,23 \text{ V}. \quad (2.8)$$

Polttokennon sähköinen hyötysuhde η saadaan tuotetun sähköenergian ja polttoaineen entalpian muutoksen suhteesta eli

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} \cdot 100\%. \quad (2.9)$$

Entalpia on polttoaineeseen sitoutunut kokonaisenergia. Vetyä ja happea polttoaineenaan käyttävän polttokennon entalpian muutos lähtöaineiden ja reaktiotuotteiden välillä on

$$\Delta H = (h)_{H_2O} - (h)_{H_2} - \frac{1}{2}(h)_{O_2}. \quad (2.10)$$

Kun reaktiossa syntyvä vesi on nestemäisessä muodossa standardiolosuhteissa, entalpian muutos on -286 kJ/mol. Tätä arvoa kutsutaan vedyn entalpian ylemmäksi lämpöarvoksi (Higher heating value, HHV). Entalpian muutos on negatiivinen, koska reaktiossa vapautuu lämpöä eli se on eksotermisen. [6]

Kennon teoreettinen maksimihyötysuhde η_e^{\max} saadaan Gibbsin vapaan energian muutoksen ja vedyn ylemmän lämpöarvon suhteesta, kun oletetaan, että koko Gibbsin vapaa energia voidaan muuttaa sähköenergiaksi eli

$$\eta_e^{\max} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \cdot 100\% = \frac{237,13 \text{ kJ/mol}}{285 \text{ kJ/mol}} \cdot 100\% \approx 83\%. \quad (2.11)$$

Todellisuudessa polttokennon hyötysuhde ei ole näin hyvä, vaan siihen vaikuttaa erilaiset häviöt.

2.2 Häviötyypit

Yhtälön (2.5) mukaisesti Gibbsin vapaan energian muutos pienenee, kun lämpötila kasvaa. Yhtälön (2.9) perusteella polttokennon hyötysuhteenkin pitäisi pienentyä lämpötilan kasvaessa. Todelliset polttokennot eivät toimi maksimihyötysuhteella, vaan niissä tapahtuu erilaisia häviöitä. Nämä häviöt yleensä pienenevät lämpötilan kasvaessa. Polttokennon häviöitä ovat aktivointi-, ohmiset, konsentraatio- ja vuotovirtahäviöt.

Aktivointihäviöt aiheutuvat sähkökemiallisten reaktioiden hitaudesta elektrodien pinnalla. Osa polttokennon tuottamasta energiasta kuluu reaktioiden edistämiseen. Polttoainemolekyylien täytyy ylittää tietty energiakynnys, jota kutsutaan aktivointienergiaksi, jotta reaktiot tapahtuvat riittävällä nopeudella. Aktivointihäviöitä tapahtuu kummallakin elektrodilla. Matalan lämpötilan kennoilla aktivointihäviöt tapahtuvat pääasiassa kato-dilla, koska hapen pelkistyminen on paljon hitaampaa kuin vedyn hapettuminen. Akti-vointihäviöistä aiheutuvaa kennojännitteen alenemista ΔV_a kuvataan Tafelin yhtälöllä [5, s.437]

$$\Delta V_a = \frac{RT}{\beta n F} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right), \quad (2.12)$$

missä R on yleinen kaasuvakio, β on varauksen siirtokerroin, i on kennon virrantiheys ja i_0 on siirtymävirrantiheys.

Yhtälö (2.12) esitetään usein muodossa

$$\Delta V_a = a + b \ln(i), \quad (2.13)$$

missä

$$a = \frac{RT}{\beta n F} \ln(i_0), \quad (2.14)$$

ja

$$b = \frac{RT}{\beta n F}. \quad (2.15)$$

Varauksen siirtokerrointa kutsutaan myös nimellä symmetriakerroin. Varauksen siirto-kerroin kuvaa, miten polarisaatio jakautuu anodivirran ja katodivirran välillä. Varauksen siirtokertoimen arvo on aina 0 ja 1 välillä ja yleensä se on anodille noin 0,5 ja katodille 0,1–0,5. Kertoimen arvo riippuu elektrodin materiaalista ja tapahtuvasta kemiallisesta reaktiosta. [7, s.162]

Elektrodien reaktiot (2.1) ja (2.2) voivat tapahtua molempiin suuntiin. Tasapainotilan-teessa hapettumista ja pelkistymistä tapahtuu yhtä paljon, jolloin nettovirrantiheys on nolla. Tasapainotilanteessa varauksia kuitenkin liikkuu ja siitä aiheutuvaa virrantiheyttä kutsutaan siirtymävirrantiheydeksi i_0 . Mitä suurempi siirtymävirrantiheys on, sitä pa-rempi on kennossa virran kulku.

Siirtymävirrantiheys i_0 kasvaa lämpötilan funktiona, joten aktivointihäviöt pienenevät lämpötilan kasvaessa. Aktivointihäviöt ovatkin merkittävä häviölähde matalan lämpöti-lan kennoissa. Siirtymävirrantiheyden suuruuteen voidaan vaikuttaa elektrodien suun-

nittelulla. Elektrodiin aktiivista pinta-alaa voidaan kasvattaa karhentamalla elektrodien pintaa, jolloin siirtymävirrantiheys kasvaa. Elektrodeilla käytettävä katalyytti parantaa varausten siirtymistä. Katalyyttinä käytetään usein erityisesti matalan lämpötilan polttokennoilla jalometalleja, koska niillä saadaan suurimmat siirtymävirrantiheydet. Siirtymävirrantiheys pienenee, jos katodille syötetään puhtaan hapen sijasta ilmaa. [7, s.161]

Ohmiset häviöt syntyvät elektrodien resistanssista ja ionien liikettä elektrolyytissä vastustavasta resistanssista. Ohmiset häviöt ΔV_{Ω} voidaan ilmaista Ohmin lain mukaisesti

$$\Delta V_{\Omega} = ri, \quad (2.16)$$

missä r on polttokennon ominaisresistanssi. Ohmisiin häviöihin voidaan vaikuttaa valitsemalla hyvin sähköä johtavat kennomateriaalit. Kennon elektrolyytillä on suuri vaikutus Ohmisiin häviöihin. Ohmiset häviöt ovat sitä pienemmät, mitä ohuempi elektrolyytti on. Ohuella elektrolyytillä on kuitenkin negatiivinen vaikutus kennon mekaaniseen vakauteen ja kestävyys. [7, s.164]

Konsentraatiohäviöt syntyvät, kun systeemin reagoivissa aineissa tapahtuu konsentraatiomuutoksia elektrodien pinnalla polttoaineen kuluessa. Reaktantin osapaine pienenee, minkä seurauksena kennojännite alenee. Konsentraatiohäviöitä syntyy esimerkiksi silloin, kun kennoon syötetään puhtaan hapen sijasta ilmaa. Reaktantin konsentraatio pienenee virrantiheyden kasvaessa. Osapaineen vaikutus kennojännitteeseen ΔV saadaan Nernstin yhtälön avulla [8, s.45]

$$\Delta V = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{C_B}{C_S} \right), \quad (2.17)$$

missä C_B on reaktantin massakonsentraatio ja C_S on reaktantin konsentraatio katalyytin pinnalla. Fickin lain mukaan reaktantin moolivirtaus N on verrannollinen konsentraatioeroon [8, s.46]

$$N = \frac{D(C_B - C_S)}{\delta} A, \quad (2.18)$$

missä D on reaktantin diffuusiokerroin, δ on diffuusiomatka ja A on elektrodin aktiivinen pinta-ala. Faradayn lain mukaan virrantiheys on verrannollinen siirrettävään varaukseen ja reaktantin kulutukseen pinta-alaa kohden

$$i = nF \frac{N}{A}. \quad (2.19)$$

Yhdistämällä yhtälöt (2.18) ja (2.19) saadaan

$$i = \frac{nFD(C_B - C_S)}{\delta}. \quad (2.20)$$

Konsentraatio saavuttaa nollan, kun reaktantti kulutetaan samalla, kun se saavuttaa katalyytin pinnan. Tämä tapahtuu rajoittavalla virrantiheydellä i_1 . Polttokenno ei pysty tuottamaan rajoittavaa virrantiheyttä suurempia arvoja, koska katalyytin pinnalla ei ole silloin enää reaktantteja. Rajoittava virrantiheys saadaan, kun C_S on nolla. Tällöin rajoittavaksi virrantiheydeksi saadaan yhtälöstä (2.20)

$$i_1 = \frac{nFDC_B}{\delta}. \quad (2.21)$$

Yhdistämällä yhtälöt (2.17), (2.20) ja (2.21) saadaan konsentraatiohäviöitä ΔV_{kon} kuvaava yhtälö

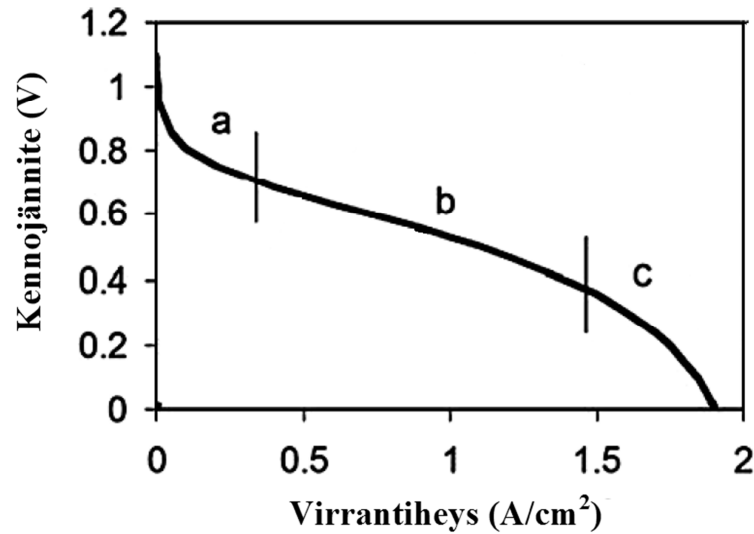
$$\Delta V_{kon} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{i_1}{i_1 - i} \right). \quad (2.22)$$

Vuotovirtahäviöt aiheutuvat polttoaineen ylivuodosta ja sisäisistä virroista. Ylivuodossa osa vedystä kulkeutuu suoraan anodilta katodille ilman, että syntyy sähkövirtaa. Katodilla vety reagoi suoraan hapen kanssa, jolloin jokaista vetymolekyyliä kohti jää kaksi elektronia käyttämättä. Vedyn ylivuotoon vaikuttaa elektrolyytin permeabiliteetti ja paksuus sekä vedyn osapaineen ero elektrolyytin eri puolilla. Sisäiset virrat syntyvät, kun osa anodilla syntyneistä elektroneista ei kulkeudu ulkoisen piirin kautta vaan elektrolyytin läpi ilman, että syntyy sähkövirtaa. [9, s.92]

Sekä ylivuodon että sisäisten virtojen vaikutuksesta osa polttoaineesta kuluu ilman, että siitä saadaan ulkoisen piirin kautta hyödynnettävää sähkövirtaa. Hyödyntämättä jäävän polttoaineen määrä on kuitenkin hyvin pieni polttoaineen kokonaiskulutukseen nähden. Polttoaineen hävikkiä merkittävämpää on vuotovirran vaikutus kennon tyhjäkäyntijännitteeseen ja kennojännitteeseen toimittaessa hyvin pienillä virrantiheyksillä. Tyhjäkäyntitilanteessa kennon virrantiheys i on nolla, mutta sisäiset virrat i_s poikkeavat nolasta. Sisäiset virrat aiheuttavat polttokennon tyhjäkäyntijännitteen alenemisen. Tyhjäkäyntijännitteen aleneminen selvästi alle 0,9 V voi kertoa vetyvuodosta ja kennon ikääntymisestä. Virrantiheyden i kasvaessa vedyn konsentraatio katalyytillä kasvaa, minkä seurauksena vedyn kulkeutuminen elektrolyytin läpi pienenee ja sisäisten virtojen vaikutus muuttuu hyvin pieneksi. [8, s.43]

Kuvassa 2.2 on esitetty virrantiheyden vaikutus kennojännitteeseen. Alhaisilla virrantiheyksillä eli kuvan kohdassa a, kennojännite tippuu hyvin nopeasti. Tällöin kennossa vaikuttaa erityisesti aktivointihäviöt. Kohdassa b jännite laskee lineaarisesti virrantiheyden kasvaessa. Tällöin kennossa vaikuttaa erityisesti Ohmiset häviöt. Suurilla virranti-

heyden arvoilla eli kohdassa c kennossa vaikuttaa erityisesti konsentraatiohäviöt. Tällöin kennojännite tippuu hyvin nopeasti virrantiheyden kasvaessa.



Kuva 2.2 Virrantiheyden vaikutus kennojännitteeseen [7]

Kun vuotovirtahäviöistä aiheutuva sisäinen virta i_s otetaan huomioon, polttokennon jännitteeksi V saadaan yhtälöt (2.12), (2.16) ja (2.22) yhdistämällä

$$V = E_0 - \frac{RT}{\beta n F} \ln \left(\frac{i + i_s}{i_0} \right) - r(i + i_s) - \frac{RT}{n F} \ln \left(\frac{i_1}{i_1 - i - i_s} \right). \quad (2.23)$$

2.3 Polttokennotyypit

Polttokennot jaotellaan yleensä niissä käytettyjen elektrolyyttimateriaalien mukaan. Elektrolyytin mukaan lajiteltuna polttokennotyypit ovat kiinteä polymeeripolttokenno (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC), alkalipolttokenno (Alkaline Fuel Cell, AFC), fosforihappopolttokenno (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC), sulakarbonaattipolttokenno (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC), kiinteäoksidipolttokenno (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) ja suora metanolipolttokenno (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC).

Kennot voidaan jakaa myös käyttölämpötilan mukaan matalan ja korkean lämpötilan kennoihin. Matalan lämpötilan kennot toimivat tyypillisesti 60–200 °C lämpötilassa ja korkean lämpötilan kennot 600–1000 °C lämpötilassa. Kennojen luokittelu lämpötilan mukaan ei ole aina yksiselitteistä, mutta yleensä MCFC ja SOFC luokitellaan korkean lämpötilan kennoiksi ja muut kennotyypit matalan lämpötilan kennoiksi. Taulukkoon 2.1 on koottu eri kennotyypien ominaisuuksia. DMFC on polymeeripolttokenno, joka käyttää polttoaineenaan metanolia. Muilta ominaisuuksiltaan PEMFC ja DMFC ovat samanlaiset, joten ne on sijoitettu taulukossa samaan sarakkeeseen.

Taulukko 2.1 Kennotyyppien ominaisuuksia [5]

	AFC	PEMFC (DMFC)	PAFC	MCFC	SOFC
Tyypillinen toimintalämpötila	60–100 °C	60–80 °C	200 °C	650 °C	800–1000 °C
Elektrolyytti	Kaliumhydroksidi (KOH)	Poly-meeri	Fosforihappo	Sulakarbonaatti	Kiinteä oksidi
Elektrolyytin olomuoto	Neste	Kiinteä	Neste	Neste	Kiinteä
Katalyyttimetalli	Jalo / epäjalo	Jalo	Jalo	Epäjalo	Epäjalo
Polttoaine	H ₂ NH ₃	H ₂ (CH ₃ OH)	H ₂	H ₂ CO CH ₄	H ₂ CH ₄ CO NH ₃

Alkalipolttokennolla elektrolyytinä toimii kaliumhydroksidi (KOH). Alkalisen elektrolyytin takia AFC:n elektrodeilla tapahtuvat reaktiot eroavat PEM-kennoista. AFC:n anodilla alkalihydroksyyli-ionit (OH⁻) reagoivat vedyn kanssa



Katodilla happi reagoi elektronien ja veden kanssa muodostaen OH⁻ioneja

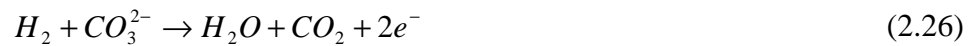


Alkalipolttokennojen kokonaisreaktio on kuitenkin sama kuin PEM-kennoilla eli reaktio (2.3). Alkalipolttokennojen tyypillinen toimintalämpötila on 60–100 °C, mutta korkeammilla toimintapaineilla sitä voidaan käyttää jopa 230 °C lämpötiloissa. Emäksisen elektrolyytin takia AFC:n katalyytin ei tarvitse olla jalometalli, vaan se voi olla esimerkiksi nikkeliä. Alhaisessa käyttölämpötilassa jalometallilla saadaan kuitenkin nopeamat kennoreaktiot. Tällöin katalyyttinä on yleensä platina. [7, s.174]

Alkalipolttokennoja on käytetty 1960-luvulta lähtien avaruushjelmissä. Alkalikennojen etuna on niiden komponenttien edullisuus, jos katalyyttinä ei ole jalometalli. Katodilla tapahtuvassa hapen pelkistymisessä aktivointihäviöt ovat pienemmät kuin muilla matalan lämpötilan kennoilla. Alkalikennojen suurin haittapuoli on se, että elektrolyytti reagoi hiilidioksidin kanssa. Hiilidioksidia kulkeutuu katodille ilman mukana. Ajan myötä elektrodi muuttuu huokoisemmaksi, kaasuvirtaukset estyvät paikallisesti ja kennon suorituskyky heikkenee.[7, s.174]

Fosforihappokennojen elektrolyytti on happo, joten sen elektrodireaktiot ovat samat kuin PEM-kennoille. Fosforihappokenno on ensimmäinen kaupallisesti valmistettu kennotyyppi. Fosforihappokennoja käytetään varavoimana esimerkiksi sairaaloissa ja armeijan tukikohdissa. Fosforihapon jäätymislämpötila on 42 °C, minkä takia polttokennoja täytyy pitää tätä lämpimämmissä olosuhteissa. Tämän takia kenno soveltuu parhaiten stationäärisiin sovelluksiin, joissa on helppo pitää lämpötila jäätymispisteen yläpuolella. Kennon tyypillinen toimintalämpötila on yli 150 °C. [5, s.447]

Sulakarbonaattikennoissa elektrolyytinä on usein joko litium-kaliumkarbonaatti tai litium-natriumkarbonaatti. Elektrolyytti on liikkuva ja hyvin syövyttävä, mikä aiheuttaa haasteita polttokennon materiaalivalinnoille. Liikkuva elektrolyytti on nestemäinen ja elektrolyyttiä täytyy kierrättää pumppujen avulla polttokennossa. MCFC:n elektrodien reaktiot eroavat muista polttokennotyypeistä. Anodireaktio on



ja katodireaktio on



MCFC on korkean lämpötilan kenno ja sen tyypillinen toimintalämpötila on 600–700°C. Sulakarbonaattikennot soveltuvat stationäärisiin sovelluksiin ja laivoihin, koska niissä järjestelmän suhteellisen suuri koko ja hidas käynnistymisaika eivät ole yhtä suuria ongelmia kuin muissa sovelluksissa. Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa (Combined Heat and Power, CHP) polttokennojärjestelmän kokonaishyötysuhde nousee, kun syntyvä hukkalämpö voidaan hyödyntää. Korkean lämpötilan takia kennon reaktiot saadaan riittävän nopeiksi ilman kalliita katalyyttejä ja polttoaineena voidaan käyttää hiilivetyjä, kuten maakaasua. Korkean lämpötilan takia materiaalivalinnoissa täytyy kiinnittää huomiota niiden mekaaniseen kestävyys ja elinikään. [5, s.448]

Kiinteäoksidipolttokennossa elektrolyytti on oksidi-ioneja johtavaa keraamista materiaalia, joka on usein yttrium-stabiloitua zirkonia. Kiinteän elektrolyytin ansiosta kennossa itsessään ei ole liikkuvia osia. Kennon anodireaktio on



ja katodireaktio on



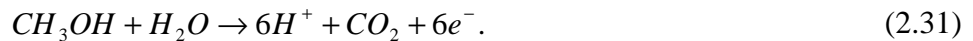
Kiinteäoksidikennojen toimintalämpötila on 800–1000 °C. Korkean toimintalämpötilan ansiosta kennossa voidaan käyttää polttoaineena hiilivetyjä. Kennot eivät myrkyty hii-

limonoksidista (CO) ja voivat käyttää sitä lähes yhtä tehokkaasti polttoaineenaan kuin vetyä. Tällöin kennon anodireaktio on



Kuten sulakarbonaattikennot kiinteäoksidikennot soveltuvat kohteisiin, joissa niiden korkeasta toimintalämpötilasta ei ole haittaa, vaan sitä voidaan pikemminkin hyödyntää. Oksidikennojen ongelmana on kuitenkin se, että niiden keraaminen elektrolyytti on hauras eikä ne siksi sovellu kohteisiin, joissa voi olla suuria värähtelyjä.

PEM-kennot käyttävät polttoaineenaan vetyä ja hapettimena joko happea tai ilmaa. PEM-kennoja käsitellään tarkemmin luvussa 2.4. Eräs PEM-kennojen variaatio on suora metanolipolttokenno, joka voi käyttää polttoaineenaan metanolia. Metanoli syötetään anodipuolelle, jonka reaktio on



Katodilla reaktio on



Tällöin kennon kokonaisreaktio on



Metanolin käytön etuina ovat sen nestemäinen olomuoto, mikä helpottaa polttoaineen kuljetusta ja varastointia. Metanolia on myös helppo valmistaa esimerkiksi maakaasusta, biomassasta tai kaatopaikkakaasusta. DMFC:llä on kuitenkin verrattain pieni tehotiheys, hidas tehovaste ja pieni hyötysuhde. Pieni hyötysuhde johtuu kennon aktivointihäviöistä, jotka DMFC:llä on merkittävät myös anodilla. DMFC:llä myös ylivuodosta aiheutuvat häviöt ovat poikkeuksellisen suuret. DMFC soveltuu parhaiten pieniin kannettaviin käyttökohteisiin, joissa huono hyötysuhde ei ole kuluttajien kannalta tärkeimpiä ostopäätökseen vaikuttavia tekijöitä. [7, s.178–179]

Polttokennotyyppien valintaan vaikuttaa se, mihin käyttösovellukseen se tulee. Taulukossa 2.2 on esitetty eri kennotyyppien tyypillisimpiä käyttökohteita. Korkean lämpötilan kennot soveltuvat erityisen hyvin CHP-sovelluksiin ja suuria tehoja vaativiin kohteisiin, kuten laivoihin. Matalan lämpötilan kennot sopivat pienempiin kohteisiin kuten esimerkiksi kannettavaan elektroniikkaan tai keskeytymättömän virransyötön varmistamiseen (englanniksi Uninterruptible Power Supply, UPS).

Taulukko 2.2 Eri kennotyyppien tyypillisiä käyttökohteita [7]

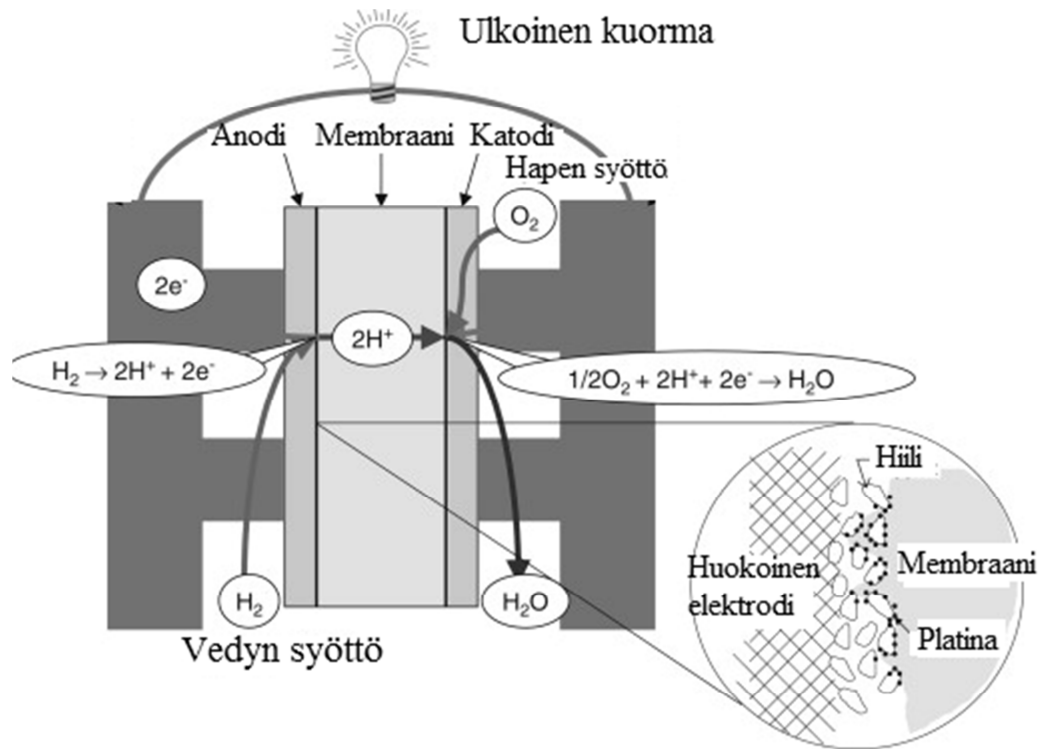
Käyttökohde	Teho	Matala lämpötila			Korkea lämpötila		
		AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC	
Kannettava elektroniikka	1–100 W		+				
CHP	1–5 kW		+	+			+
UPS	1–1000 kW		+				
Henkilöautot	10–100 kW		+				
Veneet	50–500 kW		+				+
Linja-autot ja rekat	100–500 kW		+				+
Laivat	1–50 MW			+	+		+
Voimalaitos	10 – 1000 MW			+	+		+
Avaruustekniikka	1–10 kW	+	+				

Taulukosta 2.2 huomataan, että eniten sovelluskohteita on PEMFC:llä ja SOFC:llä. Tutkimus onkin viime aikoina keskittynyt matalan lämpötilan kennojen osalta PEMFC:hen ja korkean lämpötilan kennojen osalta SOFC:hen. PEMFC:tä pidetään parhaimpana tekniikkana polttokennoajoneuvoihin. [7, s.173]

2.4 PEM-kenno

Ensimmäiset PEM-kennot kehitettiin 1960-luvulla Yhdysvaltojen avaruusohjelman käyttöön. PEM-kennot ovat matalan lämpötilan kennoja. Niiden tyypillinen toimintalämpötila on 60–80 °C. Kennojen matala lämpötila mahdollistaa nopean käynnistymisen ja sen vuoksi PEM-kennosta on tullut suosituin vaihtoehto polttokennoajoneuvojen voimanlähteeksi. PEM-kennoissa on myös korkea tehotehous, mikä mahdollistaa kennon kompaktin koon. PEM-kennon etuja ajoneuvokäytössä on myös sen kiinteä elektrolyytti. Kiinteä elektrolyytti pysyy muuttumattomana, eikä se liiku tai höyrysty kennosta. [5, s.444]

Kuvassa 2.3 on esitetty PEM-polttokennon rakenne. Kennon keskellä on protoneja johtava elektrolyytti, joka on polymeerimembraani. Membraanin molemmilla puolilla on huokoiset elektrodit. Elektrolyytin ja elektrodien kokonaisuutta kutsutaan nimellä membraani-elektrodi-kokoonpano (Membrane Electrode Assembly, MEA). MEA on virtauslevyjen välissä. Virtauslevyt kuljettavat polttoaineen ja hapettimen kennoon sekä johtavat sähköä.



Kuva 2.3 PEM-polttokenno [8]

Elektrolyytinä toimivan polymeerimembraanin tärkein tehtävänä on johtaa protoneita. Sen täytyy myös pitää polttoaine ja reaktantikaasut erillään toisistaan sekä olla kemiallisesti että mekaanisesti kestävä. Membraani on yleensä valmistettu perfluorosulfonihaposta (perfluorosulfonic acid, PFSA). Kaupallisesti sitä myy esimerkiksi Dupont nimellä NafionTM. PFSA valmistetaan lisäämällä polytetrafluorietyyleeniin (PTFE) sulfonihappoa. PTFE on kemiallisesti hyvin stabiilia ja hylkii vettä. Sulfonihappo taas sitoo itseensä vettä. Tällä tavalla vettä hylkivään elektrolyyttiin saadaan vettä sitovia alueita, mikä helpottaa kennon kosteustasapainon ylläpitämistä. [7, s.177]

PEM-kennon toiminnan kannalta oikean kosteustasapainon ylläpitäminen on tärkeää. Elektrolyytin täytyy olla riittävän kostea, jotta ionit pääsevät kulkemaan sen läpi. Katodilla syntyvä vesi diffundoituu anodille konsentraatioeron takia. Ideaalitilanteessa katodilla syntyvä vesi pitää elektrolyytin sopivan kosteana. Vetyionit kuitenkin vetävät vesimolekyylejä anodilta katodille, mikä voi johtaa anodin kuivumiseen. Erityisesti korkeilla lämpötiloilla myös katodille syötetty ilma voi kuivattaa kennostoa liikaa. Elektrolyytti ei saa kuitenkaan olla liian märkä, koska silloin diffuusiokerroksen huokokset tukkeutuvat. Oikean kosteustasapainon saavuttamiseksi PEM-kennot vaativat usein erillisen kosteudensäätöjärjestelmän. [7, s.177]

PEM-kennon elektrodit ovat ohuita katalyyttikerroksia membraanin pinnalla. Toiselta puoleltaan katalyytti kiinnitetään kaasudiffuusiokerrokseen. PEM-kennoissa käytettävä katalyytti on aina jalometalli, yleensä platina tai platinaseos, joka on kiinnitetty hiilijauheeseen. Ensimmäisissä PEM-kennoissa platinan korkea määrä, noin 28 mg/cm², vai-

kutti suuresti myös kennon hintaan. Platinan määrää kennoissa on kuitenkin pystytty vähentämään ja sitä on nykyään $0,1\text{--}0,5\text{ mg/cm}^2$ [7, s.177]. Platina on katalyyttisesti aktiivinen, mikä mahdollistaa hyvän suorituskyvyn. Aktiivisuuden haittapuolena on se, että platina reagoi voimakkaammin hiilimonoksidin kuin hapen kanssa. Epäpuhtaudet kiinnittyvät katalyyttiin ja se myrkyttyy. Myrkyttyneissä kohdissa vety ja happi eivät pääse katalyytille ja polttokennon suorituskyky heikkenee. [5, s.444]

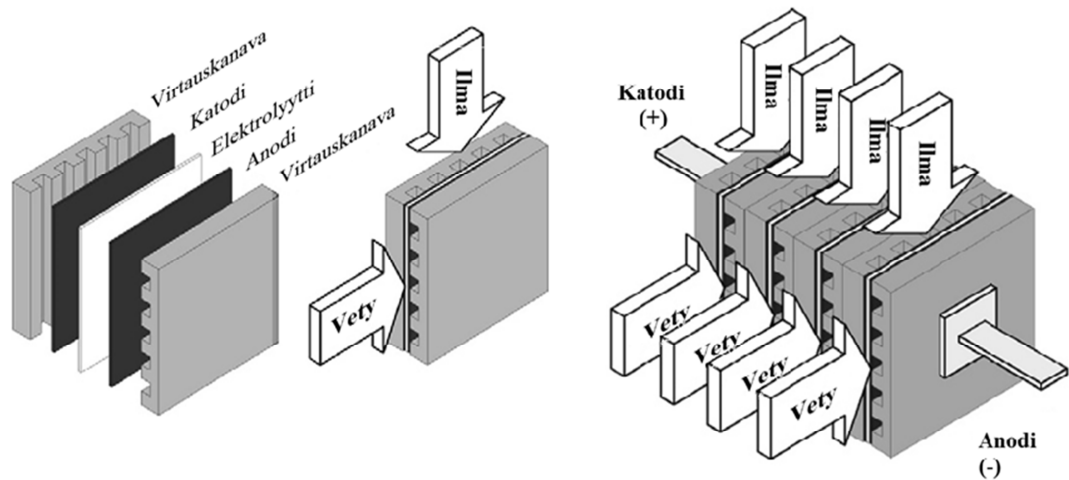
Kaasudiffuusiokerros on huokoinen, kaasuja ja elektroneja kuljettava kerros katalyytin ja virtauslevyjen välissä. Kaasudiffuusiokerros on usein tehty hiilikuitupaperista. Kaasudiffuusiokerros ei osallistu sähkökemiallisiin reaktioihin. Sen tehtävinä on johtaa elektroneja virtauslevylle, diffundoida kaasureaktantit virtauslevyiltä katalyytille, siirtää vettä virtauslevyjen ja katalyytin välillä, siirtää reaktiossa syntyvää lämpöä virtauslevyille ja toimia mekaanisena eristeenä virtauslevyjen ja membraanin välillä. [9, s.85]

PEM-kennon operointipaine voi olla sama kuin ilmanpaine tai se voi toimia paineistettuna. Paineen nostaminen kasvattaa kennojännitettä ja saatavaa tehoa. Kun kennossa käytettävä vety ja happi ovat valmiiksi varastoituneena paineistettuna kaasuna, saadaan paras kokonaishyötysuhde, kun polttokennon energiaa ei kulu paineistamiseen. Yleensä hapettimena käytetään kuitenkin ilmaa, joka ei ole varastoituneena järjestelmässä. Tällöin ilman paineistamiseen tarvitaan puhaltimia tai kompressoreja. Oheislaitteet tarvitsevat sähköenergiaa ja lisäävät järjestelmän monimutkaisuutta.[8, s.119]

Kuten jo aiemmin on todettu, PEM-kennon tyypillinen toimintalämpötila on $60\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kenno voi kuitenkin toimia kylmemmissäkin oloissa, eikä sitä tarvitse esilämmittää tullakseen toimintakykyiseksi. Erityisesti autoteollisuuden tarpeisiin on kehitetty kennoja, jotka käynnistyvät jopa $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötiloissa. Kylmissä oloissa kenno ei kuitenkaan toimi nimellistehollaan. Toimintalämpötilan ylärajan asettaa membraanin materiaali. Useimmat membraanit kuivuvat ja vahingoittuvat yli $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötiloissa. Tämän takia kennoissa syntyvä lämpö pitää saada poistettua ja kennot vaativat usein erillisen jäähdytysjärjestelmän.[8, s.121]

2.5 Polttokennojärjestelmä

Luvussa 2.1 todettiin vetykäyttöisen polttokennon reversiibeliksi tyhjäkäynti jännitteeksi $1,23\text{ V}$. Yksittäisen PEM-polttokennon jännite on tyypillisesti alle 1 V . Käytännön sovelluksiin yksittäisen kennon jännite on yleensä liian pieni, joten kennoja yhdistetään useamman kennon polttokennostoksi (fuel cell stack). Kuvassa 2.4 on vasemmalla puolella kuvattu yhden polttokennon rakenne ja oikealla puolella neljän polttokennon muodostama kennosto.

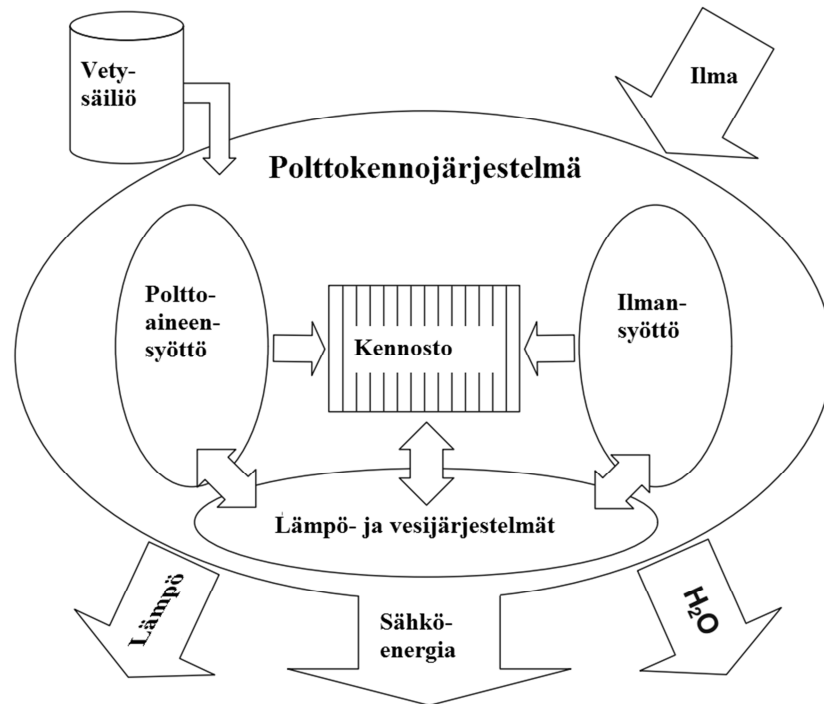


Kuva 2.4 Yksittäisen polttokennon rakenne ja polttokennosto [7]

Yksittäisessä kennossa on virtauskanavat, joissa ilma ja polttoaine kulkevat. Kennostossa vierekkäisten kennojen virtauskanavat ovat yhdistettynä samaan levyyn, jota kutsutaan bipolaarilevyksi. Bipolaarilevyillä on paljon muitakin tehtäviä kuin kaasujen toimittaminen elektrodeille ja pitäminen erillään. Bipolaarilevyt yhdistävä kennot sarjaan, joten niiden täytyy olla sähköisesti hyvin johtavia. Levyt toimivat myös kennoston rakenteellisenä tukena. Bipolaarilevyjen pitäisikin olla riittävän lujia, mutta samalla mahdollisimman kevyitä. Bipolaarilevyt kuljettavat myös jäähdytysaineen levyille. [8, s.104]

Bipolaarilevyt valmistetaan yleensä joko grafiittikomposiitista tai metallilevystä. Grafiittikomposiitit ovat kemiallisesti stabiileja, mutta rakenteeltaan hauraita, mikä vaikeuttaa niiden valmistusta. Metallilevyt johtavat paremmin sähköä kuin grafiittikomposiitti. Metallilevyjä voidaan myös helposti valmistaa sarjatuotantona ja niistä voidaan tehdä ohuita. Metallilevyjen ongelmana on kuitenkin niiden korroosion kestävyys ja ne tarvitsevat korroosiosuojauksen. Metallilevyt voidaan yhdistää grafiittikomposiittilevyjen kanssa niin, että kahden grafiittikomposiittilevyn välissä on metallilevy. Näin saadaan yhdistettyä grafiittikomposiitin korroosion kestävyys sekä metallilevyjen kaasun läpäisemättömyys ja jäykkyys. Tällainen bipolaarilevy on kevyt, kestävä ja helppo valmistaa. [8, s.107]

Polttokennosto tarvitsee myös monenlaisia oheisjärjestelmiä (Balance of Plant, BoP). Polttokennojärjestelmän vaatimat oheislaitteet vaihtelevat järjestelmän käyttökohteen ja -tavan mukaan. Esimerkiksi käytettäessä polttokennoa vaihtovirtaa vaativille laitteille tarvitaan DC/AC-muunnin muuttamaan polttokennon tuottama tasavirta vaihtovirraksi. Kuvassa 2.5 on esitetty eräs polttokennojärjestelmä. Järjestelmään kuuluvat kennon lisäksi polttoaineen- ja ilmansyöttö sekä lämmön- ja kosteudensäätöjärjestelmät. Lähes kaikille polttokennojärjestelmille yhteisiä peruskomponentteja ovat vedyn- ja ilmansyöttöjärjestelmät, jäähdytysjärjestelmä ja tehonsäätöjärjestelmä.



Kuva 2.5 Polttokennojärjestelmä [9]

Vedyn- ja ilmansyöttöjärjestelmät koostuvat usein pumpuista ja kompressoreista, jotka pumppaavat vetyä anodille ja ilmaa katodille. Useat polttokennosovellukset tarvitsevat myös polttoainevaraston. Kennoissa syntyvä lämpö täytyy poistaa kennoista, jotta vältetään ylikuumenemiselta. Jäähdytys voidaan tehdä joko jäähdytysilmalla tai -nesteillä. Jäähdytysilmaa voidaan puhaltaa suuria määriä katodille tai erillisiin jäähdytyskanaviin. Toinen tapa jäähdyttää on kierrättää jäähdytysnestettä jäähdytyskanavissa. Nesteen kiertäminen vaatii kiertopumpun ja yhden tai useamman lämmönsiirtimen. Polttokennojärjestelmässä pitää yleensä olla myös tehonsäätöjärjestelmä. Tämä tarkoittaa tehoelektronikkakomponentteja ja DC/DC-muunninta, jolla voidaan saavuttaa tarvittaessa tasaisempi tai suurempi jännite.[7, s.170]

Yksittäinen polttokenno on yksinkertainen laite, joka ei sisällä liikkuvia osia. Käytännön sovelluksien vaatimien oheislaitteiden seurauksena polttokennojärjestelmien monimutkaisuus lisääntyy. BoP-laitteet muodostavat suuren osan kennon massasta ja tilavuudesta. Lisäksi ne vaikuttavat polttokennojärjestelmän hintaan ja kokonaishyötysuhteeseen. Polttokennojärjestelmän hinnasta noin puolet tulee polttokennon ja puolet BoP-laitteiden hinnasta. Polttokennojen valmistuskustannuksiin vaikuttaa erityisesti elektrodien kustannukset ja elektrodien kustannuksiin vaikuttaa käytetyn platinan määrä. BoP-laitteista kallein on tyypillisesti ilmansyöttöjärjestelmä [10, s.127]. Polttokennolinja-autojen vaatimia oheislaitteita on tarkemmin kuvattu kappaleessa 5.1.2.

3. POLTTOKENNOKÄYTTÖISET KULKUNEUVOT

Polttokennojen hyödyntämistä erityisesti kulkuneuvosovelluksissa on tutkittu viime vuosina. Polttokennot vähentävät kulkuneuvojen riippuvuutta fossiilisista polttoaineista ja erityisesti öljystä. Kun polttokennokulkuneuvot käyttävät polttoaineenaan vetyä, niistä syntyvä pakokaasu on vesihöyryä. Tämän takia polttokennokulkuneuvojen yleistymisen voi vähentää liikenteestä syntyviä päästöjä. Ajon aikaisesta päästöttömyydestä on myös hyötyä suljetuissa tiloissa käytettävissä kulkuneuvoissa.

Polttokennokulkuneuvoissa on sähkömoottori, jonka kaikki tai osa tarvitsemasta sähköenergiasta tuotetaan polttokennoilla. Polttokennojen etu akkuihin nähden on se, että polttokennoja ei tarvitse ladata vaan ne tankataan. Tankkaaminen on tyypillisesti nopeampaa kuin lataaminen. Polttokennokulkuneuvoilla on myös pidempi toimintasäde kuin akkukäyttöisillä kulkuneuvoilla. Polttokennoja voidaan käyttää myös apuvoimalaitteina (Auxiliary Power Unit, APU). APU ei tuota energiaa kulkuneuvon työntövoimaan, vaan se tuottaa energiaa kulkuneuvon muihin järjestelmiin, kuten esimerkiksi ilmastointiin.

Useat polttokennokulkuneuvot ovat vasta kaupallistumisen alussa tai eivät ole vielä kaupallistuneet. Koska polttokennokulkuneuvoja on vielä hyvin vähän sarjatuotannossa, niiden hinnat ovat selvästi korkeammat kuin kauan markkinoilla olleiden tuotteiden. Polttokennokulkuneuvot tarvitsevat myös toimivan vetyinfrastruktuurin. Vetyinfrastruktuurilla tarkoitetaan vedyn tuotantoa, kuljetusta ja varastointia sekä tankkausasemia.

3.1 Autot

Polttokennoautojen pääkomponentit ovat polttokennojärjestelmä, vetytankki, säätöelektroniikka, energiavarasto ja sähkömoottori. Autoissa käytetään PEM-polttokennoja niiden sopivan tehotiheyden ja käyttölämpötilan takia. Säätöelektroniikka, energiavarasto ja sähkömoottori ovat komponentteja, joita käytetään myös polttomoottorin ja sähkömoottorin hybridautoissa ja akkukäyttöisissä sähköautoissa. Synergia näiden tekniikoiden välillä auttaa myös polttokennoautojen kehitystä ja valmistuskustannusten alenemista. Henkilöautoissa polttoaineena käytettävä vety on yleensä varastoitu yhteen tai kahteen paineistettuun vetysäiliöön. Henkilöautojen vedyn varastointipaineeksi on yleistynyt 700 bar.

Useat isot autovalmistajat, kuten Daimler, Honda, Hyundai ja Toyota ovat kehittäneet omia polttokennohenkilöautomallejaan. Autovalmistajien laajempi polttokennoautojen kehitystyö alkoi 1990-luvulla. Honda aloitti vuonna 2008 polttokennoauton FCX Clarityn sarjatuotannon. Ensimmäisiä autoja oli mahdollisuus saada käyttöönsä leasing-

periaatteella eli kuukausivuokralla. Autoja annettiin valittujen asiakkaiden käyttöön Yhdysvalloissa ja Japanissa. Autossa oli 100 kW Hondan valmistama PEM-polttokenno ja 100 kW litium-ioni akku.[11]

Tällä hetkellä henkilöautomarkkinoilla on Toyotan polttokennoauto Mirai ja Hyundai ix35 FCEV. Hondan on tarkoitus tuoda uusi Clarity markkinoille vuoden 2016 aikana. Hyundai ix35 FCEV tuotanto alkoi 2013. Ix35 FCEV on ollut myynnissä Pohjois-Amerikassa, Etelä-Koreassa ja 11 Euroopan maassa. Hyundai ix35 veroton hinta Saksassa on noin 65 500 euroa. Pohjois-Amerikassa autoa on myyty nimellä Tucson FCV ja sen on saanut käyttöönsä vain leasing-periaatteella. [12]. Toyota Mirai tuli markkinoille 2015 Japanissa, Yhdysvalloissa, Saksassa, Isossa-Britanniassa ja Tanskassa. Saksassa Toyota Mirain hinta ilman veroja on noin 66 000 euroa. Toyota on valinnut myyntipaikkansa sen mukaan, missä on riittävä vetytankkausasemien verkosto. Kesällä 2016 Toyota Mirain myynti alkaa Norjassa ja Ruotsissa [13].

Taulukossa 3.1 on esitetty valmistajien antamia teknisiä tietoja Hyundai ja Toyotan polttokennoautoista. Hyundai ix35 on tyypiltään katumaasturi ja Toyota Mirai on sedan. Toyotan polttokennon teho on hieman korkeampi kuin Hyundai. Hyundaiassa taas on isompi tankki.

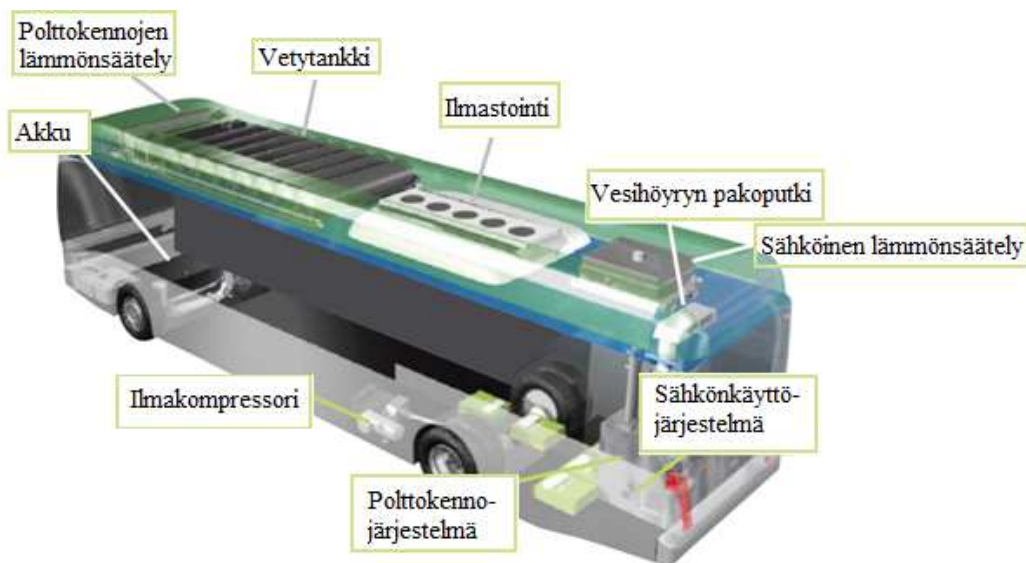
Taulukko 3.1 Hyundai ix35 ja Toyota Mirai teknisiä tietoja [14; 15]

		Hyundai ix35	Toyota Mirai
Polttokenno	Teho (kW)	100	114
Energiavarasto	Tyyppi	Litiumioniakku	Nikkelimetallihydridiakku
Sähkömoottori	Maksimiteho (kW)	100	113
	(Nm)	300	335
Vetytankki	Säiliöiden lukumäärä	2	2
	Kokonaistilavuus (l)	144	122,4
	Varastoitavan vedyn massa (kg)	5,6	5
	Toimintapaine (bar)	700	700
	Täyteen tankkausaika (min)	3	5
Suorituskyky	Maksimi nopeus (km/h)	160	178
	Kiihtyvyys 0-100 km/h (s)	12,5	10
	Toimintamatka (km)	594	480
Auton mitat	pituus / leveys / korkeus (mm)	4410 /1820/1650	4890/1815/1530

Polttokenno voi olla myös linja-auton voimanlähteenä. Ympäri maailmaa on tällä hetkellä käytössä yli 100 polttokennolinja-autoa. Polttokennolinja-autot ovat kaupunkikäytössä. Polttokennolinja-autoja valmistaa esimerkiksi Daimlerin EvoBus, Van Hool,

Toyota ja Solaris. Osa linja-autovalmistajista, kuten Toyota, valmistaa itse polttokennot. Polttokennovalmistajia ovat esimerkiksi Ballard, Hydrogenics ja UTC Power. Polttokennolla toimivien linja-autojen etu muihin sähkölinja-autoihin on se, että niiden tankkausaika voi olla alle 10 minuuttia, kun taas akkukäyttöiset linja-autot tarvitsevat yleensä yön yli kestävästä latauksesta. Polttokennolinja-auton toimintasäde yhdellä tankkauksella on noin 400 km [2].

Kuvassa 3.1 on polttokennolinja-auto ja sen pääkomponentit. Polttokennolinja-auton pääkomponentit ovat samat kuin henkilöautoissakin. Komponentit voivat olla sijoitettuna linja-autoon monilla eri tavoilla. Vetytankki on kuitenkin yleensä sijoitettu linja-auton katolle ja niitä on enemmän kuin henkilöautoissa. Polttokennolinja-autoista on kerrottu enemmän luvussa 5.



Kuva 3.1 Polttokennolinja-auto [16]

Linja-autojen lisäksi polttokennoja on käytössä myös muissa raskaan liikenteen soveluksissa. Yhdysvalloissa on käytössä tai suunnitteilla 50 raskasta tai keskiraskasta polttokennoajoneuvoa. Keskiraskaiden ajoneuvojen suurin sallittu kokonaismassa on yli 3500 kg mutta alle 6350 kg. Tällaisia ajoneuvoja ovat esimerkiksi kuorma-autot ja jakeluautot. Polttokennojakeluautoja on Yhdysvalloissa käytössä esimerkiksi FedEx- ja UPS-kuljetuspalveluyhtiöillä Kalifornian ja Tennesseen alueilla. Yli 6350 kg ajoneuvoissa polttokennoja käytetään roska-autoissa ja lyhyen matkan tavaransierrossa. Lyhyen matkan tavarankuljetus voi olla esimerkiksi laivakontin kuljetus satamasta junakuljetukseen. Yhteistä raskaille polttokennosovelluksille on, että ne tankataan keskitetysti yhdessä paikassa. [17]

Pitkän matkan linja-autoissa tai rekka-autoissa ei ole käytetty polttokennoa työntövoiman lähteenä, koska vedyn tankkausverkosto ei ole kattava näiden ajoneuvojen tarpeisiin. Eurooppalaisessa DESTA-projektissa demonstroitiin SOFC-kennon soveltuvuutta

rekan APU-laitteiston energian tuottamiseen. Projektissa Volvon rekkaan integroitiin Eberspächerin kehittämä APU-laitteisto. SOFC:n etuna muihin polttokennotyyppeihin on se, että järjestelmään voidaan syöttää dieseliä ilman että polttokenno myrkyttyy. [18]

3.2 Työkoneet

Polttokennot soveltuvat hyvin erityisesti sisätiloissa käytettävien työkoneiden voimantehkeiksi. Sisäkäyttöisiä työkoneita ovat erityisesti varastoissa käytettävät laitteet, kuten erilaiset trukit. Sisätiloissa käytettävien varastotyökoneiden täytyy olla päästöttömiä. Perinteisesti sisätiloissa on käytetty akkukäyttöisiä työkoneita. Akkukäyttöön liittyy kuitenkin ongelmia erityisesti, kun päivittäin käsiteltävät tavaramäärät ovat suuria ja työkoneen käyttöaste on korkea. Useammassa vuorossa työskenneltäessä akkuja täytyy vaihtaa työvuorojen välissä ja akkujen vaihtamiseen kuluu yhden työvuoron aikana aikaa keskimäärin 15–20 minuuttia. Lisäksi ylimääräiset akut tarvitsevat oman varastotilansa ja latauspaikkansa. Polttokennojen tankkaus kestää noin 3 minuuttia ja yhdellä tankkauksella voi ajaa työkoneita 4–8 tuntia. Nopea tankkaus parantaa työtehoa suhteessa akkukäyttöisiin työkoneisiin. Useat valmistajat, kuten Still, Raymond Corporation ja Hyster, tarjoavat sähkötrukkeihin polttokennomoduuleita, joilla voi korvata akun. [19]

Yhdysvaltojen energiaministeriö (englanniksi U.S Department of Energy, DOE) on tukenut lähes 700 polttokennotrukin käyttöönottoa ja vedyn tankkauksen järjestämistä. Hankkeesta kerätyn tiedon perusteella polttokennolla toimivat varastotyökoneet olivat akkukäyttöisiin nähden parempia huoltotarpeen ja -tilan suhteen, lataus-/ tankkausajaltaan ja tuotteen eliniän suhteen. Akkujen tarvitsema sähkö oli halvempaa kuin polttokennojen tarvitsema polttoaine vety, mutta polttokennotyökoneiden vuotuiset kokonaiskustannukset olivat pienemmät kuin akkukäyttöisten työkoneiden. Hankkeen jälkeen Yhdysvalloissa on otettu käyttöön 5000 uutta polttokennotyökoneita. [19]

Euroopassa on HyLIFT-Europe projektissa otettu käyttöön 200 polttokennotyökoneita. Projektissa käyttöönotetut työkoneet ovat varastotyökoneita ja lentokenttien työkoneita. Projektiin kuuluu myös 5–20 uuden erityisesti työkoneille tarkoitetun vetytankkausaseman käyttöönotto. Projektin tavoitteena on saada vedyn tankkaushinnaksi 8–10 €/kg, jolloin polttoainekulut olisivat samaa luokkaa kuin bensiinikäyttöisillä työkoneilla. Projekti on yksi ensimmäisistä, jossa otetaan käyttöön lentokoneen polttokennohinausvaunu. Hinausvaunu on MULAG Fahrzeugwerkin valmistama. Siinä on 20 kW moottori ja sillä on 20 kN vetokyky. Ajoneuvon tankkaus kestää 3–4 minuuttia ja yhdellä tankkauksella voi ajaa yhden työvuoron ajan. [20]

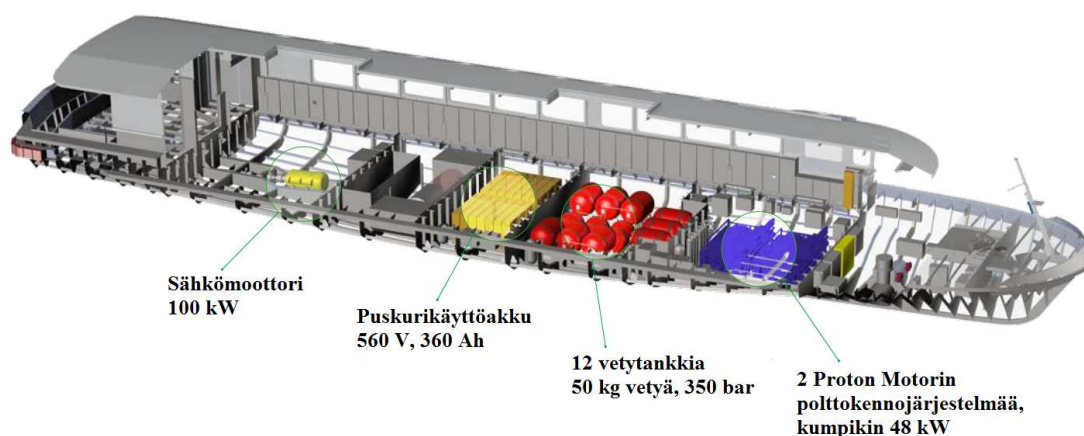
Suomessa polttokennotrukkeja myy Toyota. Toyotan polttokennotrukki on vastapainotrukki, jossa on 10 kW polttokenno. Trukissa on 1,8 kg vetytankki ja tankin paine on 350 bar. Trukin tankkausaika on 3–5 minuuttia ja yhdellä tankkauksella voi ajaa yhden työvuoron ajan. Polttokennotrukki on käytössä ainakin Oy Woikoski Ab:n tehtaalla.

[21] Suomessa Cargotec Oyj ja Konecranes Oyj ovat tutkineet polttokennojen hyödyntämismahdollisuutta satamanostureissa ja trukeissa [22].

3.3 Merenkulun sovellukset

Polttokennojen soveltuvuutta merenkulkuun on tutkittu jo pitkään. Polttokennot ovat hiljaisia voimalähteitä, mistä on etua erityisesti sotilassukellusvenekäytössä. Saksalainen Howaldtswerke-Deutsche Werft (HDW) valmistaa PEM-polttokennolla toimivia luokan 214 sukellusveneit. Järjestelmään kuuluu kaksi 120 kW polttokennoa, metalli-hydridivetyvarasto ja nestemäisen hapen varasto. Polttokennoissa syntyvä vesi kerätään talteen ja käytetään aluksen makean veden varastona. Sukellusveneitä on käytössä Italian, Korean, Kreikan, Portugalin ja Saksan armeijoilla. [23]

Polttokennoja on käytetty myös pienten, noin 20 henkilön, vesitaksien energiantuottamiseen. EU:n rahoittamassa Zemship-projektissa kehitettiin polttokennolla toimiva joki-laiva FCS Alsterwasser. Aluksessa on tilaa 100 matkustajalle ja se on vuodesta 2008 liikennöinyt Saksan Hampurissa Alster-joella. Kuva 3.2 on FCS Alsterwasserin voimantuottojärjestelmä. Järjestelmään kuuluu 2 Proton Motorin valmistamaa PEM-polttokennoa, joiden huipputeho on 48 kW. Järjestelmään kuuluu myös akusto, joka tasaa polttokennojen kuormanvaihtelua. Kun sähköenergian tarve laivalla on pieni, osa polttokennojen tuottamasta energiasta varastoidaan akkuihin. Akkuihin varastoitua energiaa käytetään, kun sähköenergian tarve on suurimmillaan. Polttokennoissa käytettävä vety on varastoitunut 12 säiliöön, joiden paine on 350 bar. Säiliöihin mahtuu 50 kg vetyä ja niiden tankkaamiseen menee noin 12 minuuttia. Laiva pitää tankata 2-3 päivän välein. [24]



Kuva 3.2 FCS Alsterwasserin propulsiojärjestelmä [24]

Suurissa rahtilaivoissa ja risteilyaluksissa on tutkittu polttokennojen soveltuvuutta APU-voimalähteeksi. Norjalaisen Eidesvik Offshoren Viking Lady on huoltoalus, johon asennettiin vuonna 2009 nesteytetyllä maakaasulla toimiva sulakarbonaattikenno. Laiva oli osana FellowSHIP projektia, johon kuului Det Norske Veritas (DNV), Wärtsi-

lä ja Eidesvik Offshore. Polttokennojärjestelmän toimitti saksalainen MTU Onsite Energy, ja kennon teho on 320 kW. Kennon on tarkoitus toimia pääasiallisena voimanlähteenä laivan ollessa satamassa. [25] Vuonna 2010 Wärtsilän WC20-polttokenno asennettiin ruotsalaisen Wallenius Linen Undine-nimiseen autonkuljetusalukseen. Polttokenno oli SOFC-kenno ja teholtaan 20 kW. Kenno toimi metanolilla ja sitä käytettiin laivan sähkön ja lämmön tuotantoon [26]. Wärtsilän polttokennotoiminta siirrettiin Wärtsilän osaomistamalle Convion Ltd. -yritykselle vuonna 2013 [27]. Risteilyaluksiin polttokennojen soveltuvuutta on tutkittu saksalaisessa Pa-X-ell-projektissa. Siinä Meyer Werftin risteilyalukseen asennetaan korkean lämpötilan PEM-kenno, joka on teholtaan 30 kW. Kennon on tarkoitus osallistua laivan sähkön tuotantoon ja lämmityksen säätelyyn. [28]

3.4 Muut liikenteen sovellukset

Polttokennojen käyttäminen kaksipyöräisissä kulkuneuvoissa, kuten polkupyörissä ja skoottereissa, on vasta varhaisessa tutkimusvaiheessa. Suzukin polttokennoskootteri Burgman on saanut EU-tyyppihyväksynnän ja se on ollut testattavana Lontoossa. Pyörässä on Intelligen Energy Ltd:n valmistama 4 kW PEM-kenno. Taiwanissa on ollut 80 polttokennoskootterin kokeilu. Skootterit oli Asia Pacific Fuel Cell Technologies (APFCT) valmistamia ja niissä oli 2,5 kW PEM-kennot. Taiwan on tiheään asuttu alue ja siellä on paljon skootterivalmistajia. Tämän takia Taiwanissa on keskitytty erityisesti polttokennoskoottereiden tutkimiseen. [29]

Polttokennoa on kokeiltu myös lentokoneissa. Vuonna 2008 Boeing testasi PEM-polttokennoa kaksipaikkaisessa pienlentokoneessa. Lentokoneessa oli myös litiumioniakku, joka avusti 1000 metrin lentokorkeuden saavuttamisessa. Lentokorkeuden saavutettua koneella lennettiin 20 minuuttia pelkän polttokennolla tuotetun sähköenergian voimin 100 km/h nopeudella. Boeing tutkii myös polttokennojen käyttämistä miehittämättömien lennokkien voimantuottajana. [30] Ilmailualallakin polttokennot nähdään ensisijaisesti APU-laitteiden voimantuottajana. Airbus tutkii yhdessä DLR German Aerospace ja Parker Aerospaceen kanssa kaasuturbiinilla toimivan APU-järjestelmän korvaamista 100 kW polttokennojärjestelmällä. Polttoaineena käytettävä vety varastoitaisiin lentokoneessa nestemäisenä. [31]

Erilaisia polttokennoprototyypppejä on tehty myös raideliikennettä varten. Polttokennovetureiden käyttämistä kaivosteollisuudessa on tutkittu jo 1970- ja 1980-luvuilla. Kaupunkiliikenteeseen tarkoitettujen polttokennoraideliikenteen tutkimus on lisääntynyt 2000-luvulla. Vuonna 2008 Japanissa East Japan Railway Company testasi hybridijunaa, jossa oli kaksi 65 kW PEM-polttokennoa ja 19 kWh litium-ioniakku. Japanin lisäksi polttokennoraideliikennetutkimusta tehdään Euroopassa, Yhdysvalloissa, Etelä-Koreassa ja Kiinassa. [32]

4. LAIT, SÄÄDÖKSET JA STANDARDIT

Vety eroaa monilta ominaisuuksiltaan muista polttoaineista. Vedyn keveys ja syttymis-herkkyys täytyy ottaa huomioon vetyä käsiteltäessä. Vedyn turvallinen käyttö pyritään määrittelemään lainsäädännössä. Polttokennoajoneuvojen ja niiden tankkaukseen liittyvien laitteiden on täytettävä lainsäädännön ja viranomaisohjeiden niille antamat määräykset. Tässä luvussa käsitellään Euroopan unionin säädöksiä, eli lähinnä direktiivejä, ja Suomen kansallisia säädöksiä, joita erityisesti vetykäyttöisten ajoneuvojen ja tankkausasemien kohdalla tulee ottaa huomioon. Luvussa ei käsitellä lakeja ja säädöksiä, jotka ovat täysin samoja sekä polttokennoajoneuvoille että muille ajoneuvoille.

Euroopan unionin jäsenmaiden on noudatettava EU-säädöksiä. EU-säädökset voidaan jakaa asetuksiin, direktiiveihin ja päätöksiin. Asetukset ovat sitovia ja suoraan sovellettavia säädöksiä, jotka eivät vaadi jäsenvaltioilta erillisiä päätöksiä tullakseen kansallisesti voimaan. Direktiivi määrittää tavoitteet, joihin jokaisen jäsenvaltion on toimenpiteillään ja lainsäädännöllään yllettävä. Valtio voi itse kuitenkin päättää, miten se toteuttaa direktiivin edellyttämät toimenpiteet. Jos direktiivissä on määrätty minimitaloite, kansallinen säädäntö voi asettaa tiukemmat säännökset. Päätökset ovat kaikilta osin sitovia niille, joille ne on osoitettu. Lisäksi EU voi antaa suosituksia ja lausuntoja, joilla se ilmaisee mielipiteensä. Suositukset ja lausunnot eivät kuitenkaan ole sitovia. [33]

Säädösten lisäksi on monenlaisia standardeja ja ohjeita, joita polttokennoajoneuvojen ja tankkauslaitteiden tulisi täyttää. Standardeilla pyritään varmistamaan tuotteiden turvallisuus, laatu ja tekninen yhteensopivuus. Lainsäädännössä voidaan myös viitata johonkin standardiin, jotta säädöksiin ei tarvitse kirjoittaa kaikkia teknisiä yksityiskohtia. Standardeja noudattamalla on helppo osoittaa, että tietty tuote täyttää lainsäädännön vaatimukset.

4.1 Vedyn aineominaisuudet

Vety on jaksollisen järjestelmän ensimmäinen ja kevyin alkuaine. Vedyn höyrystymislämpötila on -253 °C , joten se esiintyy yleensä kaasuna. Taulukkoon 4.1 on kerätty vedyn, metaanin ja bensiini aineominaisuuksia. Normaali ilmanpaineessa huoneenlämmössä vety ja metaani ovat kaasuja ja bensiini nestettä. Vedyn itsesyttymislämpötila eli lämpötila, jossa se syttyy ilman ulkoista liekkiä tai kipinää, on 585 °C eli samaa luokkaa kuin metaanilla, jonka itsesyttymislämpötila on 540 °C . Bensiinin itsesyttymislämpötila on paljon matalampi eli $230\text{--}480\text{ °C}$.

Taulukko 4.1 Vedyn, metaanin ja bensiinin aineominaisuuksia [34]

	Yksikkö	Vety	Metaani	Bensiini
Molekyylikaava		H ₂	CH ₄	C _x H _y (x = 4-12)
Moolimassa	g/mol	2,02	16,04	100–105
Tiheys (20°C, 1bar)	kg/m ³	0,08	0,67	751
Kaasun tiheys ilman suhteen	ilma = 1	0,07	0,56	3,66
Kiehumispiste	°C	-253	-162	27–225
Syttymisalue	til.-%	4,0–75	5,0–15	1,4–7,6
Itsesyttymislämpötila	°C	585	540	230–480

Vety ja metaani ovat ilmaa kevyempiä. Jos vetyä pääsee vuotamaan avoimessa ulkotilassa, se kohoaa ja sekoittuu tehokkaasti ilmaan, jolloin vetypitoisuus laimenee nopeasti. Avoimessa tilassa kaasuvuoto voi olla muita polttoaineita vaarattomampi. Suljetussa tilassa vety kohoaa ylöspäin täyttäen tilan ylhäältä alaspäin. Kaasuuntunut bensiini painuu ilmaa painavampana alaspäin. Jos tilan katossa on poistoilmakanavia, vety poistuu ensimmäisenä niiden kautta ulkoilmaan.

Vedyn syttymisalue ilmassa on 4–75 tilavuusprosenttia. Jos vetyä pääsee kerääntymään suljettuun tilaan, se voi syttyä helposti pienestäkin kipinästä. Vety palaa kuumalla ja lähes näkymättömällä, kalpean sinisellä liekillä. Vetykaasusäiliö voi revetä vetyliekin kosketuksesta, josta seuraa vetyräjähdys [35].

Ihmisen on vaikea havaita vetyvuotoa, koska vety on hajuton, väritön ja mauton kaasu. Myös metaani on hajuton kaasu, mutta siihen voidaan lisätä hajuaineita. Vetyyn hajusteita ei voi lisätä, koska ei ole olemassa riittävän kevyttä hajuainetta, joka leviäisi vedyn mukana. Vety ei ole syövyttävä aine, mutta se voi haurastuttaa joitakin metalleja. Ympäristölle vety on vaaraton ja myrkytön aine. Vety, kuten muutkin kaasut, voi syrjäyttää suljetussa tilassa hapen ja aiheuttaa tukehtumisen. [35]

Nestemäisenä vety on myös väritöntä ja hajutonta. Nestemäistä vetyä käsiteltäessä on otettava huomioon sen erittäin kylmä lämpötila. Nestemäinen vety aiheuttaa ihmiselle vakavia paleltumia ja kudosaivourioita. Jos vetyä pääsee läikkymään huoneilmaan, se höyrystyy nopeasti ja leviää ilmaan. [36]

4.2 Vetykäyttöisten moottoriajoneuvojen tyyppihyväksyntä

Moottoriajoneuvojen ja niiden perävaunujen hyväksymistä säätelee Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (2007/46/EY) [37]. Vetyä käyttövoimanaan käyttävien ajoneuvojen tyyppihyväksynnän vaatimuksia on vahvistettu Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksessa 79/2009. Asetus vahvistaa myös vaatimukset vetykomponenttien ja -järjestelmien tyyppihyväksynnälle ja asentamiselle.

Asetuksen mukaan vetykomponenttien ja -järjestelmien on toimittava turvallisesti ja kestävä sähköisiä, mekaanisia, termisiä ja kemiallisia käyttöolosuhteita vuotamatta ja muotoaan muuttamatta. Vetyjärjestelmien täytyy olla suojattu ylipaineelta ja niiden täytyy kestää odotettuja lämpötiloja ja paineita odotetun käyttöikänsä ajan. Vedyn virtausuunta täytyy merkitä komponentteihin. Asetuksessa annetaan määräykset sekä nestemäistä että kaasumaista vetyä käyttävien ajoneuvojen vetysäiliöiden ja -komponenttien vaatimuksista ja testausmenetelmistä. Ajoneuvon vetykäyttöisyys ja nestemäisen tai paineistetun kaasumaisen vedyn käyttö voidaan merkitä, jotta palo- ja pelastustoimijat osaavat suhtautua ajoneuvon oikein. Asetus ei kuitenkaan ota kantaa, miten merkintä pitäisi tehdä. [38]

Taulukossa 4.2 on esitetty nestemäisen ja paineistetun (kaasumaisen) vedyn kanssa käytettävät komponentit, jotka vaativat tyyppihyväksynnän vetykäyttöiseen ajoneuvon asennettuina. Nestemäisen vedyn kanssa käytettynä sulkuventtiili tai takaiskuventtiili tarvitsee tyyppihyväksynnän, jos niitä käytetään turvalaitteena. Paine-, lämpötila- ja virtausanturit tarvitsevat tyyppihyväksynnän molempien polttoaineiden kanssa käytettynä, jos niitä käytetään turvalaitteena. Lisäksi joustava polttoainejohto tarvitsee tyyppihyväksynnän nestemäisen vedyn kanssa käytettäessä, jos se on ennen ensimmäistä automaattista sulkuventtiiliä.

Taulukko 4.2 Tyyppihyväksyttävät vetykomponentit [38]

	Nestemäinen vety	Paineistettu vety
Säiliö	x	x
Automaattinen sulkuventtiili	x	x
Säiliöasennelma		x
Liitokset		x
Sulkuventtiili	x	
Takaiskuventtiili	x	x
Joustava polttoainejohto	x	x
Lämmönvaihdin	x	x
Vetysuodatin		x
Käsiikäyttöinen tai automaattiventtiili	x	x
Painesäädin	x	x
Paineentasaussventtiili	x	x
Paineentasauslaite		x
Täyttöliitin tai täyttölähde	x	x
Irrotettava varastointijärjestelmän liitin		x
Paine-, lämpötila- ja virtausanturi	x	x
Anturit vetyvuodon havaitsemiseksi	x	x

Polttoaineen syöttöjohdot on suojattava automaattisilla sulkuventtiileillä, jotka sulkeutuvat vetyjärjestelmän toimintahäiriön aikana. Takaiskuventtiilit tai muut vastaavat venttiilit huolehtivat siitä, että vety ei virtaa väärään suuntaan täyttötilanteissa. Säiliöön asennettujen sulkuventtiilien tehtävänä on estää kaasun virtaus säiliöstä onnettomuustilanteessa. Vetyjärjestelmän on oltava erillään ajoneuvon matkustamosta, jotta vetyä ei pääse kertymään. Myös ajoneuvon tuuletus- ja lämmitysjärjestelmät on suunniteltava siten, että vetyä ei pääse matkustamoon.

4.3 Palo- ja räjähdysvaaraan liittyviä säädöksiä

Palo- ja räjähdysvaaraan liittyviä säädöksiä ovat ATEX-laitedirektiivi, ATEX-työolosuhdedirektiivi sekä Seveso III -direktiivi. ATEX-laitedirektiivi (94/9/EY) asettaa vaatimukset räjähdysvaarallisissa tiloissa eli Ex-tiloissa toimiville laitteille [39]. Polttokennoajoneuvojen kohdalla tämä tarkoittaa sitä, että ajoneuvon täytyy täyttää direktiivin vaatimukset vain, jos se on nimenomaan tarkoitettu käytettäväksi räjähdysvaarallisessa tilassa. Liikennekäyttöön tarkoitettujen polttokennolinja-autojen ei siis tarvitse kokonaisuutena täyttää ATEX-vaatimuksia. Kuitenkin jos laitteessa on itsessään sellainen alue, jossa on räjähdysvaarallisen ilmaseoksen kertymisen riski, alueelle sijoitettavien laitteiden on täytettävä ATEX-direktiivin vaatimukset. Polttokennoajoneuvojen ja vedyn tankkausjärjestelmien kohdalla täytyy arvioida, ovatko vetyä sisältävät osat, kuten vetytankki ja vetyputkisto, Ex-luokiteltuja alueita. Jos Ex-luokitelluille alueille täytyy asentaa jokin laite, laitteen täytyy silloin täyttää ATEX-laitedirektiivin vaatimukset.

ATEX-työolosuhdedirektiivi (1999/92/EY) määrittää vähittäisvaatimukset räjähdysvaarallisten ilmaseosten kanssa alttiiksi joutuvien työntekijöiden turvallisuuden varmistamiseksi. Vedyn tankkausasemien kohdalla täytyy arvioida, voiko niissä syntyä räjähdysvaarallisia eli Ex-tiloja. Ex-tila voi syntyä, jos esimerkiksi vetysäiliössä tai muussa laitteistossa tapahtuu vetyvuotoa. Vuodon määrästä, ilmanvaihdosta ja sekoittumisesta riippuu, syntyykö vuotokohtaan Ex-tila. Tankkausaseman työnantajan täytyy huolehtia räjähdysvaaran selvittämisestä, räjähdysvaarallisten ilmaseosten syntymisen estämisestä ja suojautumisesta, työntekijöiden mahdollisuudesta tehdä työ turvallisesti ja direktiivin vaatiman räjähdysuojausasiakirjan laatimisesta. [40]

Seveso III -direktiiviä (2012/18/EU) sovelletaan vaarallisista aineista aiheutuvien suur-onnettomuuksien ehkäisemiseen. Vedyn osalta direktiiviä sovelletaan tuotantolaitoksiin ja varastoihin, joissa vedyn määrä on vähintään viisi tonnia [41]. Polttokennoajoneuvoissa tai vetytankkausasemilla vedyn määrä on huomattavasti pienempi. Sen sijaan valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien käsittelyn ja varastoinnin valvonnasta (21.5.2015/685) määrittää, että vähäisen käsittelyn ilmoitusraja vedylle on 100 kg. Vetytankkausasemilla, joissa on vetyä myös varastoituna, vedyn ilmoitusraja voi ylittyä. Tällöin toiminnanharjoittajan täytyy tehdä alueelliselle pelastuslaitokselle ilmoitus. Ilmoituksessa tulee selvittää tankkausaseman perustietojen lisäksi selvitys vedyn vaaroista, onnettomuusriskeistä, käyttöturvallisuustiedotteet, paloturvallisuussuunnitelma ja

mahdollisten vuotojen hallinasta ja muiden onnettomuuksien varalta suunnitelluista toimenpiteistä.[42]

4.4 Painelaite- ja sähköturvallisuus

Painelaitedirektiiviä (97/23/EY) sovelletaan sellaisiin painelaitteisiin, joiden suurin sallittu täyttöpaine on yli 0,5 bar. Painelaitedirektiivi ei kuitenkaan koske ajoneuvojen toimintaan tarkoitettuja laitteita. Näin ollen polttokennolinja-auton korkeapaineiset kaasusäiliöt eivät kuulu painelaitedirektiiviin. Sen sijaan vetytankkausasemalla sijaitsevien korkeapaineisten vetyvarastojen tulee noudattaa painelaitedirektiiviä. Jos vety tuodaan tankkausasemalle putkistossa, kuulu putkistot painelaitedirektiiviin, jos niiden nimellinen halkaisija (Diameter Nominal, DN) on yli 25 mm ja suurin sallittu käyttöpaine on yli 0,5 bar. Myös vetysäiliöön liittyvien putkien ja letkujen täytyy noudattaa painelaite-direktiiviä, jos niiden nimellinen halkaisija on yli 25 mm ja paine yli 0,5 bar. Painelaite-direktiivi määrittää muun muassa painelaitteiden olennaiset turvallisuusvaatimukset.[43]

Kun vety tuodaan tankkausasemalle kuljetettavissa kaasusäiliöissä, niitä koskee kuljetettavien painelaitteiden direktiivin (2010/35/EU) säädökset. Direktiivi määrittää kuljetettavien painelaitteiden yksityiskohtaiset säännöt turvallisuuden parantamiseksi ja vapaan liikkuvuuden varmistamiseksi. Kuljetettavat painelaitteet tulee merkitä pii-merkillä. Pii-merkintä osoittaa, että kuljetettava paineastia täyttää direktiivin vaatimukset.[44]

Pienjännitedirektiivi (2006/95/EY) asettaa turvallisuusvaatimukset sähkölaitteille niin, etteivät ne aiheuta vaara ihmisille, kotieläimille tai omaisuudelle. Direktiivi koskee sähkölaitteita, joiden nimellisjännite vaihtovirralla on 50–1000 V tai tasavirralla 75–1500 V. [45] Sähkön tuottamiseen tarkoitettut laitteet ovat sähkölaitteita, joten ajoneuvoissa olevat polttokennojärjestelmät kuuluvat pienjännitedirektiivin piiriin. Pienjännitedirektiivin vaatimukset sisältyvät Suomessa sähköturvallisuuslakiin (410/1996) [46].

4.5 Polttokennoajoneuvoihin liittyviä standardeja ja ohjeita

Polttokennoajoneuvoihin ja niiden tankkaukseen liittyviä standardeja ovat julkaisseet muun muassa International Organization for Standardization (ISO), International Electrotechnical Commission (IEC), SAE International ja European Industrial Gas Association (EIGA). Standardien tehtävä on varmistaa tuotteiden turvallisuus, laatu ja tekninen yhteensopivuus.

International Organization for Standardization (ISO) on kansainvälinen standardisoimisjärjestö. Suomen standardoimisliitto (SFS) on ISO:n jäsen. Vedyin käyttö kuuluu ISO:n teknisen komitean ISO/TC 197 Hydrogen technologies toimialaan. ISO/TC 197 käsittää yhteensä 17 standardia, joista osa liittyy polttokennoajoneuvoihin tai niiden tankkauk-

seen ja osa muihin vetysovelluksiin. Polttokennoajoneuvoja koskevia standardeja hallinnoi teknisen komitean ISO/TC 22 Road vehicles alakomitea ISO/TC 22/SC 21 Electrically propelled road vehicles. ISOn verkkosivuilla on kuvattu dokumenttien tarkoitus ja hyväksymismenetelmät. [47]

International Electrotechnical Commission (IEC) on kansainvälinen sähköalan standardisoimisjärjestö. Polttokennot kuuluvat IEC:n teknisen komitean TC 105 Fuel cell technologies toimialaan. Polttokennoajoneuvojen sähköinen voimansiirtoteknologia kuuluu IEC:n teknisen komitean TC 69 Electric road vehicles and electric industrial truck toimialaan. Dokumenttityypit on esitelty IEC:n verkkosivuilla. [48]

SAE International (aikaisemmin Society of Automotive Engineers) on erityisesti liikennealan standardisoimisjärjestö. SAE Internationalilla on sekä polttokennoajoneuvoihin että vedyn käyttöön polttoaineena liittyviä standardeja. SAEn verkkosivuilla on esitetty eri dokumenttityypit. [49]

European Industrial Gas Association (EIGA) julkaisee kaasualan turvallisuuteen liittyviä raportteja ja ohjeita. EIGA ohjeistaa muun muassa nestemäisen ja kaasumaisen vedyn turvallisesta käytöstä sekä tankkausasemien ja kuljetusverkostojen rakentamisesta ja ylläpidosta. EIGAn verkkosivuilta on saatavissa vedyn käyttöön ja tankkaukseen liittyviä ohjeistuksia. [50]

Taulukkoon 4.3 on kerätty muutamia tärkeimpiä standardeja ja ohjeita polttokennoajoneuvoihin liittyen. Ne on jaoteltu yleisesti polttokennoihin ja vetyyn, polttokennoajoneuvoihin ja vedyn tankkaukseen liittyviin standardeihin ja ohjeisiin.

Taulukko 4.3 Esimerkkejä polttokennoajoneuvoja koskevista standardeista ja ohjeista

Yleisiä vety- ja polttokennoteknologiaan liittyviä standardeja ja ohjeita

ISO/TR 15916:2015 Basic considerations for the safety of hydrogen systems

- Käsittelee kaasumaisen ja nestemäisen vedyn käyttöä ja vedyn varastointia
- Tarkastelee vedyn aineominaisuuksia turvallisuuden kannalta sekä vetykäytön tyypillisiä vaaratekijöitä ja riskejä
- Ei keskity yksittäisiin vedyn käyttökohteisiin

IEC/TS 62282-1:2013 Fuel cell technologies – Part 1: Terminology

- Käsittelee polttokennoteknologiaan liittyvää terminologiaa

IEC 62282-2:2012 Fuel cell technologies – Part 2: Fuel cell modules

- Säättää minimivaatimukset polttokennomoduulien turvallisuudesta ja toiminnasta
- Käsittelee olosuhteita, joista voi aiheutua vaaraa polttokennomoduulin ulkopuolelle
- Sisältää ohjeet polttokennomoduulien yleisen turvallisuuden varmistamiselle sekä suunnittelun ja testauksen periaatteet
- Jakeluinfradirektiivi (2014/94/EU) määrää, että jaettavan vedyn puhtauden on täytettävä standardin ISO 14687-2 vaatimukset

ISO 17268:2012 Gaseous hydrogen land vehicle refueling connection devices

- Määrittelee kaasumaisen vedyn tankkaukseen tarkoitettujen moottoriajoneuvojen liittimien suunnittelun, turvallisuuden ja toiminnan ominaisuudet
- Jakeluinfradirektiivi (2014/94/EU) määrää, että vedyn tankkaukseen tarkoitettujen liittimien on täytettävä standardi ISO 17268 vaatimukset

EIGA Doc. 15/06 Gaseous hydrogen stations

- Ohjeistaa parhaista toimintatavoista kaasumaisen vedyn tankkausasemien suunnittelijoille ja toimijoille
- Tavoitteena on parantaa kaasumaisen vedyn tankkausasemien turvallisuutta

ISO 13984:1999 Liquid hydrogen – Land vehicle fuelling system interface

- Määrittää nestemäisen vedyn tankkauksen ja annostelulaitteiden ominaispiirteet
- Tarkoituksena pienentää tulipalo- ja räjähdysvaaraa tankkauksen aikana ja siten tarjota kohtuullinen suoja ihmisiin ja omaisuuteen kohdistuvia vaaroja vastaan
- Ohjeistaa tarvittavista laitteistoista ja putkistojen asennuksista sekä testaus- ja tarkkailutoimenpiteistä

Polttokennoajoneuvoihin liittyviä standardeja ja ohjeita

SAE J2578_201109 Fuel Cell Vehicle Terminology

- Määrittelee vetykäyttöisten polttokennoajoneuvojen terminologiaa

SAE J2578_201408 Recommended Practice for General Fuel Cell Vehicle Safety

- Määrittelee ohjeet polttokennojärjestelmän, vedyn varastointi- ja käsittelyjärjestelmien sekä sähköjärjestelmien turvalliseen integrointiin polttokennoajoneuvossa
 - Käsittelee polttokennoajoneuvojen yleistä suunnittelua, rakentamista, käyttöä ja huoltoa
-

ISO 23273:2013 Fuel cell road vehicles -- Safety specifications -- Protection against hydrogen hazards for vehicles fuelled with compressed hydrogen

- Nimeää vähittäisvaatimukset, joilla suojataan ihmisiä ja ympäristöä polttokennoajoneuvon sisä- ja ulkopuolella vetyyn liittyviltä onnettomuuksilta
- Käsittelee vain paineistetulla vedyllä toimivia polttokennoajoneuvoja
- Vaatimukset koskevat normaalia toimintaa ja toimintaa yksittäisvikatilanteessa
- Vaatimukset eivät koske polttokennoajoneuvon valmistusta, huoltoa ja korjausta

Polttokennoajoneuvojen tankkaukseen liittyviä standardeja ja ohjeita

ISO 14687-2:2012 Hydrogen fuel – Product specification – Part 2: Proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications for road vehicles

- Määrittää vedyn laatuvaatimukset PEM-polttokennoajoneuvoille
 - Varmistaa yhdenmukaisen vetypolttoaineen tankkausasemilla
-

Polttokennoajoneuvojen ja niiden tankkaukseen liittyvät standardit kehittyvät ja päivittyvät jatkuvasti. Ajan tasalla olevat tiedot standardien ja ohjeiden voimassaolosta ja päivityksistä on syytä tarkistaa standarditoimistojen verkkosivuilta. On myös oletettavaa, että säädökset ja standardit tulevat tarkentumaan ja lisääntymään sitä myötä kun polttokennoajoneuvot tulevat yleistymään.

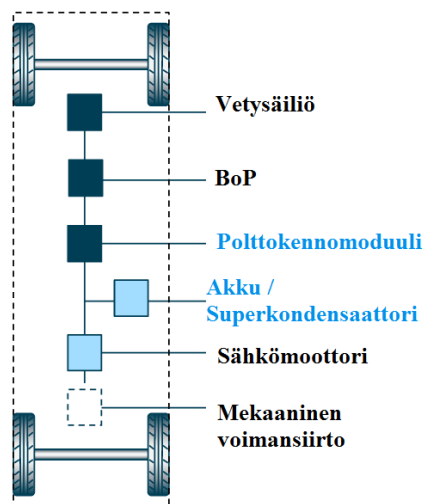
5. POLTTOKENNOLINJA-AUTO

Polttokennolinja-auto on sähkömoottorilla toimiva linja-auto. Tavallisesta sähkölinja-autosta se eroaa siten, että moottorin tarvitsema energia tuotetaan ajon aikana polttokennoissa. Polttokennolinja-autot ovat yleensä niin kutsuttuja hybridiajoneuvoja, sillä niissä on myös energiavarasto. Hybridiajoneuvo voi olla myös suunniteltu niin, että polttokenno ei ole pääasiallinen energian lähde. Tässä työssä polttokennolinja-autolla tarkoitetaan kuitenkin linja-autoa, jonka tarvitsema sähköenergia tuotetaan pääasiallisesti polttokennoissa.

Ensimmäiset prototyypit polttokennobusseista olivat käytössä 1990-luvulla. Polttokennobusseja on ollut käytössä eri puolella maailmaa erilaisissa demonstraatiohankkeissa. Tässä luvussa käsitellään polttokennolinja-auton niitä komponentteja, jotka eroavat dieselinlinja-autojen komponenteista. Lisäksi esitellään erilaisia polttokennolinja-autoprojekteja Euroopassa, Yhdysvalloissa ja Japanissa sekä polttokennolinja-autojen hintakehitystä.

5.1 Polttokennolinja-auton komponentit

Polttokennolinja-autossa on vetysäiliö, BoP, polttokennosto, sähköinen varasto, sähkömoottori ja tarvittavat invertterit sekä mekaanisen voimansiirron laitteisto. Kuvassa 5.1 on polttokennolinja-auton periaatekaavio.



Kuva 5.1 Polttokennolinja-auton periaatekaavio [51]

Polttokennolinja-autot tehdään yleensä linja-autovalmistajan mallistossa jo olevan alustan päälle. Polttokennolinja-auton niitä komponentteja, jotka ovat identtisiä diesellinja-auton komponenttien kanssa, ei tarkastella tässä työssä. Tällaisia komponentteja ovat esimerkiksi linja-auton runko, akselit ja jarrut.

5.1.1 Vetysäiliö

Vetysäiliön tehtävänä on ottaa vastaan vety jakelulaitteesta, säilöä se ja jakaa polttoainetta tarpeen mukaan. Vety voidaan varastoida ajoneuvossa paineistettuna kaasuna, nestemäisenä tai metallihydrideinä. Korkeapaineiset vetysäiliöt ovat suosituin vedyn varastointimuoto ajoneuvoissa. Osa autovalmistajista käyttää nestemäisen vedyn säiliöitä ja vain hyvin pieni osa metallihydridisäiliöitä.

Vety voi olla varastoituna 350 bar tai 700 bar paineessa. Linja-autoissa vety on yleensä varastoituneena 350 bar paineessa ja suurimmassa osassa uusista polttokennoajoneuvoista vety on varastoitunut paineistettuna kaasuna 700 bar paineessa. Paineistetun vedyn säiliöt voidaan luokitella neljään luokkaan taulukon 5.1 mukaisesti.

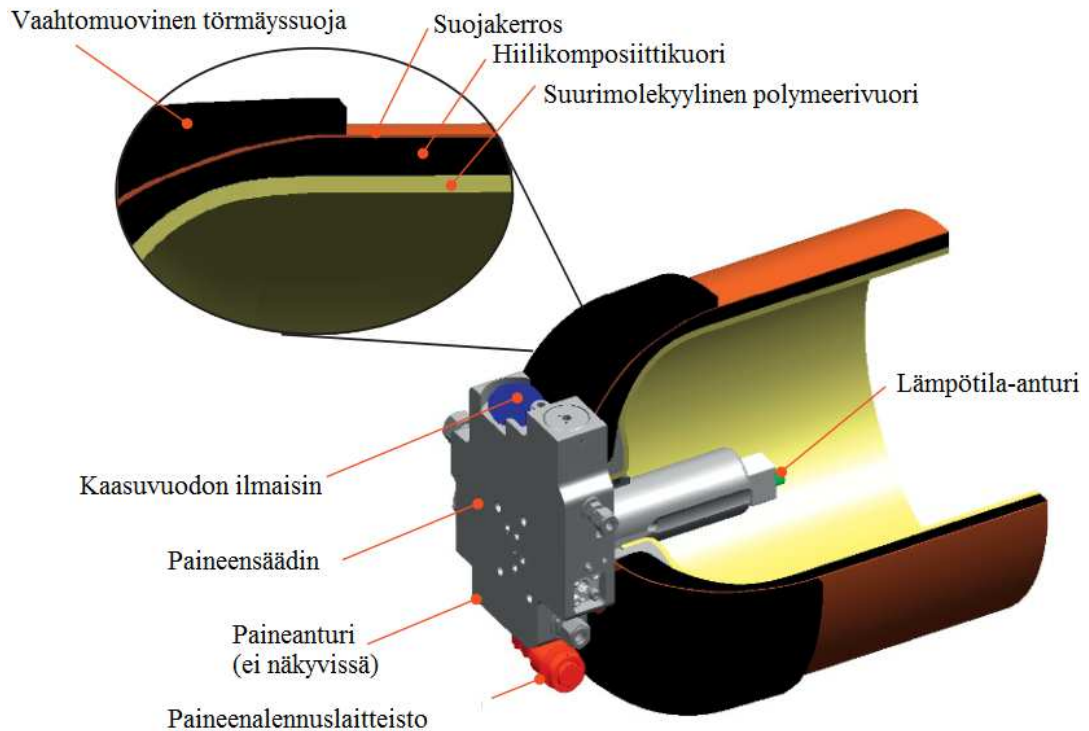
Taulukko 5.1 Paineistetun vetysäiliöiden luokittelu [38]

Säiliön tyyppi	Kuvaus
Tyyppi 1	Saumaton metallisäiliö
Tyyppi 2	Saumattomalla metallivuorella lieriöosastaan päällystetty säiliö
Tyyppi 3	Saumattomalla tai hitsatulla metallivuorella kokonaan päällystetty säiliö
Tyyppi 4	Ei-metallisella vuorella kokonaan päällystetty säiliö

Tyypin 1 säiliöt on tehty kokonaan teräksestä tai alumiinista. Tyypin 2 säiliö on metallisäiliö, johon on kääritty lujitekuitukomposiittia. Lujitekuitujen ansiosta tyypin 2 säiliöt ovat kevyempiä kuin tyypin 1 säiliöt. Tyypin 1 ja 2 säiliöitä käytetään laajalti maakaasun säilytykseen 200 bar paineessa. Tätä korkeapaineisemmän kaasun säiliö täytyy tehdä materiaalista, joka kestää korkean paineen. Säiliöstä tulee kuitenkin painava ja lisäksi vedyllä on ominaisuus haurastuttaa lujia teräksiä. Tämän takia tyypin 1 ja 2 säiliöt soveltuvat huonosti korkeapaineisen vedyn säilytykseen ajoneuvoissa.[52, s.299]

Tyypin 3 säiliöissä on metallivuori ja ne on päällystetty komposiittimateriaalilla. Metallivuori on tyypillisesti alumiinia ja päällyste hiilikuitua. Komposiittimateriaali kantaa suuren osa painekuormasta ja se säätelee metallivuorin puristusjännitystä, jolloin metallivuori kestää useampia toistuvia paineen nousuja ja laskuja. Tyypin 4 säiliö on kokonaan komposiittimateriaaleista tehty. Säiliössä on polymeerivuori, joka on tyypillisesti suuritiheyksistä polyeteeniä. Polymeerivuori parantaa säiliöiden korroosionkestävyyttä ja väsymisikää. Tyypin 4 säiliöt on päällystetty hiili- tai lasikuidulla. Päällyste kantaa

koko säiliön painekuorman. Tyypin 3 ja 4 säiliöt ovat käytetyimmät säiliötyypit paineistetulle vedylle. Kuvassa 5.2 on esitetty tyypin 4 vetysäiliön rakenne. [52, s.299]



Kuva 5.2 Tyypin 4 vetysäiliön rakenne [52]

Polttokennolinja-autojen paineistetun vedyn varastointijärjestelmä koostuu useammasta vetysäiliöstä. Lisäksi siihen kuuluu virtauksen ja paineen hallintakomponentteja, liittimiä, antureita ja polttonestejohdot säiliön ja polttokennon syöttökohdan välillä. Lisäksi säiliön täytyy kestää ulkoisia korroosion aiheuttajia, kuten ultraviolettiä, tiesuolaa ja akkuhappoja. Säiliön täytyy kestää myös vaihtelevia lämpötiloja sekä tärinää, iskuista ja törmäyksistä aiheutuvia mekaanisia kuormia. [52, s.299]

Nestemäisen vedyn tehotiheys tilavuuden suhteen on parempi kuin kaasumaisella vedyllä. Nestemäisen vedyn käytön ongelmana on kuitenkin vedyn alhainen kiehumispiste eli $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vedyn nesteytys on kallista ja nesteytykseen kuluu energiaa. Nesteytykseen kuluva energia vastaa noin 30 % vedyn energiasisällöstä. Lisäksi nestemäinen vety täytyy säilyttää hyvin eristetyssä säiliössä, jotta lämpövuoto pysyy mahdollisimman pienenä. Ajoneuvoissa nestemäisen vedyn varasto on tyypillisesti kaksiseinäinen tyhjiöeristetty säiliö. Vetyä sisältävän sisemmän säiliön on kestettävä 5-10 bar painetta. Sisäsäiliön ja tyhjiöeristeen sulkevan ulkokuoren täytyy kestää yhden baarin paine-ero. Vetysäiliö voidaan tehdä ruostumattomasta teräksestä, alumiiniseoksesta tai polymeerimateriaalista. [9, s.59]

Vety voidaan varastoida myös metallihydrideihin. Osa metalleista absorboi herkästi vetykaasua, jolloin vetyatomit liukenevat metallin kidehilan. Metallihydridistä vety voidaan tarvittaessa uuttaa käyttöön. Vedyn ja metalliseoksen reaktio on



missä M on metalli. Vedyn absorptioprosessi on eksoterminen eli siinä vapautuu lämpöä. Absorptio tapahtuu yleensä 30–60 bar paineessa. Reaktio voi tapahtua molempiin suuntiin. Vedyn purkautumisprosessi vaatii lämpöä eli se on endoterminen prosessi. Tarvittava lämpö voidaan johtaa esimerkiksi polttokennolta. Metallihydridissä vedyn tiheys on jopa korkeampi kuin nestemäisen vedyn tiheys. Tämän takia metallihydrideillä saadaan suuri varastointikapasiteetti tilavuuden suhteen. Metallihydridit ovat myös turvallinen varastointimenetelmä, koska vety ei pääse onnettomuustilanteessakaan vuotamaan. Metallihydrideissä käytetyt metallit tai metalliseokset, kuten teräs, titaani ja nikkeli, tekevät metallihydrideistä kuitenkin liian painavia ajoneuvosovelluksiin.[9, s.62]

5.1.2 Polttokennosto ja apulaitteet

Lähes kaikissa polttokennolinja-autoissa polttokenno on tyypiltään kiinteä polymeeri-kenno. PEM-kennot kootaan satojen kennojen kennostoiksi, jotta saadaan tarvittava jännite. Polttokennoston teho on tyypillisesti noin 75–150 kW. Linja-autoihin polttokennoja valmistaa kaupallisesti Ballard, Hydrogenics ja AFCC Automotive Fuel Cell Cooperation Corp. (AFCC). AFCC valmistaa polttokennoja Daimlerille ja Fordille. Toyota valmistaa linja-autoihinsa polttokennot itse. Polttokennosto ei kuitenkaan toimi yksinään, vaan se tarvitsee apulaitteiston. Polttokennolinja-autossa kennoston apulaitteisiin kuuluu polttoaineen ja ilman syöttöjärjestelmät, kosteudensäätöjärjestelmät ja lämmönsäätöjärjestelmä.

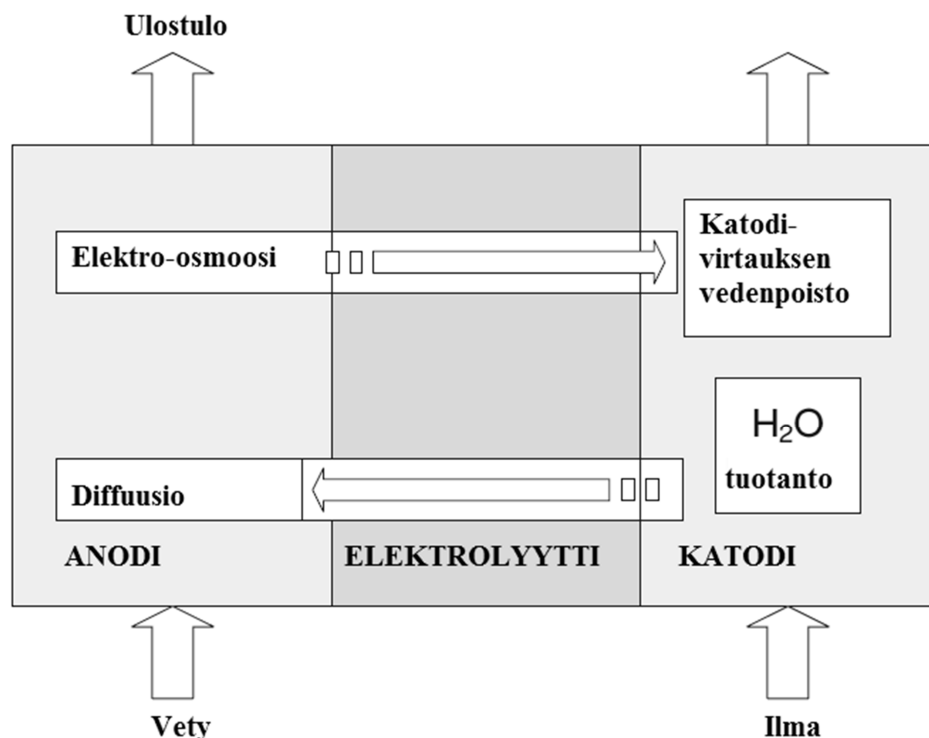
Vedyn syöttöjärjestelmän täytyy pitää huoli siitä, että paine, suhteellinen kosteus, polttoaineen puhtausaste ja virtausdynamiikka ovat polttokennoston edellyttämällä tasolla. Vety syötetään kennostoon paineistettuna kaasuna vetytankin ulkopuolella olevan venttiilin kautta. Kennoston tuottama sähkövirta säättää tarvittavan vedyn määrän sopivaksi ja ulkoisen kuorman poistuessa vedyn virtaus lakkaa. Syöttöjärjestelmään kuuluu olennaisina osina myös paineensäädin ja poistoventtiili. Paineensäädin tarkoituksena on säännellä tulopainetta niin, että polttoaineen virtausnopeus on sopiva kennolle. Kun kennossa käytetään hapettimena ilmaa, typpi saattaa ylivuotaa katodipuolelta anodille. Kosteudensäädin saattaa myös muodostaa nestepisaroita elektrodien pinnalle, mikä estää polttoaineen kulkua. Ylimääräistä typpeä ja nestettä varten järjestelmässä on poistoventtiili. Poistoventtiili on normaalisti kiinni, mutta se avautuu ajoittain lyhyeksi aikaa, jotta epäpuhtaudet saadaan poistettua kennosta. [9, s.106]

Ilman syöttöjärjestelmän tehtävänä on syöttää hapetin katodille. PEM-kennoissa yleinen hapetin on ilma. Kennon toimintakyky on parempi puhtaalla hapella kuin ilmalla. Happea ei kuitenkaan suosita ajoneuvojen hapettimena, koska happi tarvitsisi erikseen tuot-

taa, mikä laskisi ajoneuvon kokonaishyötysuhdetta. Hapelle tarkoitettu tankki veisi myös tilaa ajoneuvossa.

Ilman syöttöjärjestelmän tärkeimmät tehtävät on säätää ilman massavirtaa ja painetta. Jos ilman annetaan vapaasti virrata katodille, hapen konsentraatio jää liian alhaiseksi. Sen takia järjestelmässä täytyy olla ilmakompressorin. Kompressorin täytyy säädellä sisäänmenoilman painetta, jotta hapen osapaine ei pääse laskemaan liian alhaiseksi kennossa. Kompressorin pitäisi olla myös hiljainen, edullinen ja kompaktin kokoinen. Ilman syöttöjärjestelmässä pitää ottaa huomioon myös se, että syötettävän ilman pitää olla mahdollisimman puhdasta. Pienikin määrä öljyä tai epäpuhtauksia voi vahingoittaa kennon toimintaa. Järjestelmän kompressorin ei saa käyttää öljyä tai järjestelmään pitää kuulua ilmansuodatin. Ilman syöttöjärjestelmä on tyypillisesti polttokennoston apulaitteista eniten energiaa kuluttava. [9, s.111]

PEM-kennon membraanin pitää olla sopivasti kosteutettu, jotta ionit kulkevat siinä. Kuva 5.3 esittää veden virtausta kennossa. PEM-kennossa muodostuu katodilla vettä. Konsentraatioeron takia osa vedestä diffundoituu elektrolyytin läpi anodille. Elektronit vetävät vesimolekyylejä anodilta katodille. Tätä ilmiötä kutsutaan elektro-osmoosiksi. Elektro-osmoottinen ilmiö voimistuu virrantiheyden kasvaessa. Vetymolekyylejä myös poistuu katodilta saturoimattoman ilman mukana. [9, s.116]



Kuva 5.3 Veden virtaus PEM-kennossa [9]

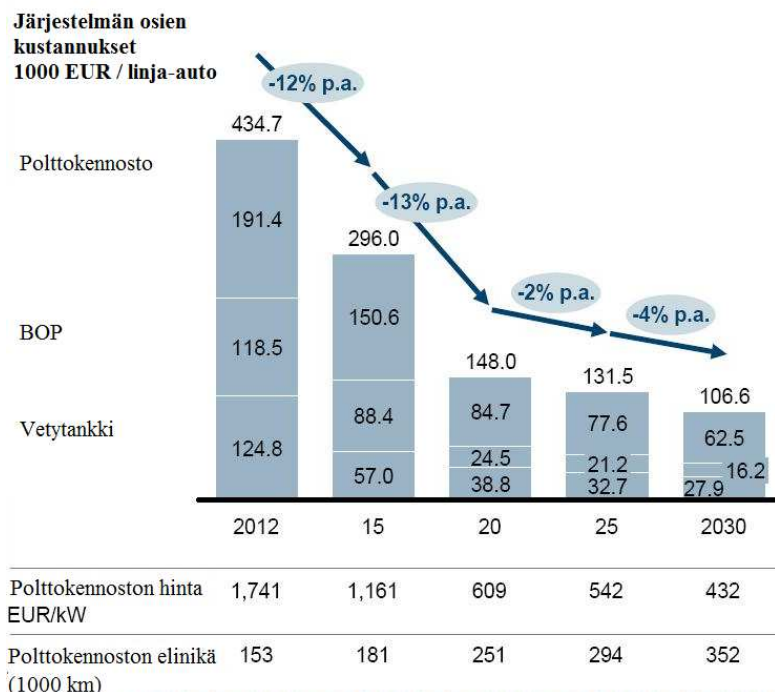
Poistoilman mukana haihtuu katodilla syntynyttä vettä erityisesti korkeilla lämpötiloilla. Toimintapaine vaikuttaa ilmavirran kosteuteen. Kosteudensäästöjärjestelmän päätehtävä

on estää kennon kuivuminen kaikissa toimintaolosuhteissa. Kenno voi pysyä itsestään kosteutettuna tietyllä lämpötilalla ja virrantiheydellä. Kennoston kosteutta voidaan säädellä myös lisäämällä vettä reaktantivirtoihin. Yleensä kostuttaminen tehdään ilmalle, mutta myös vedyn kostuttaminen on mahdollista. Kaasu voidaan kosteuttaa esimerkiksi höyryttämällä vettä tai siirtämällä poistoilman kosteutta tuloilmaan.

Kuivumisen lisäksi kennolle on vaarallista myös sen tulviminen. Tulviminen tapahtuu, kun kennon kosteus ei ole tasainen kennon sisällä ja ylimääräinen vesi kerääntyy kennoon estäen vedyn pääsyn anodille. Tulvimisen estämiseksi järjestelmässä on poistoventtiili, josta ylimääräinen vesi saadaan tarvittaessa poistettua. [9, s.120]

PEM-kennon sivutuotteena syntyy lämpöä. Tämän takia kennosto tarvitsee lämmönsäätöjärjestelmän, jotta sen lämpötila ei nouse liian suureksi. Polttokennolinja-autossa jäähdytys tehdään yleensä nestemäisen jäähdyttimen avulla. Nestemäinen jäähdytin voi olla deionisoitua vettä tai etyleeniglykolin ja veden sekoitusta. Jäähdytysjärjestelmään kuuluu nestettä kierrättävä pumppu, nestesäiliö ja lämmönvaihdin tuulettimella. Jäähdytyksen lisäksi lämmönsäätöjärjestelmään voi kuulua lämmön talteenottojärjestelmä. Lämpö otetaan talteen joko jäähdyttimestä tai ulostuloilmasta. [9, s.115]

Kuva 5.4 on polttokennojärjestelmän osien hintojen kehitysarvio. Polttokennojärjestelmien hinnan odotetaan pienenevän 12–13 % vuodessa vuoteen 2020 asti. Sen jälkeen hintojen arvioidaan pienenevän 2–4 % vuosittain. [53]



Kuva 5.4 Polttokennojärjestelmien osien hinta[53]

Vuonna 2012 linja-auton polttokennojärjestelmän, johon kuului polttokennosto, apulaitteet ja vetytankki, hinta oli 435 000 euroa. Kun kokonaistuotantokustannukset olivat

samana vuonna 741 000 euroa, polttokennojärjestelmä muodosti yli puolet tuotantokustannuksista. Polttokennojärjestelmän hinnasta itse polttokennosto muodostaa noin puolet. Polttokennoston hinta voi pienentyä 68 % vuoden 2012 hinnasta vuoteen 2030 mennessä ja apulaitteiden hinnat 86 %. Hintojen alenemiseen vaikuttaa valmistusteknologian innovaatiot, platinan määrän pieneneminen kennossa ja sarjatuotannosta saatava volyymihyöty. Polttokennostojen eliniän odotetaan myös nousevan teknologian kehittyessä.

5.1.3 Energiavarasto

Polttokennolinja-auton energiavarasto voi olla akku, superkondensaattori tai niiden yhdistelmä. Niihin voidaan varastoida esimerkiksi jarrutusenergiaa. Jarruttaessa sähkömoottori toimii generaattorina ja muuttaa osan jarrutusenergiasta sähköenergiaksi. Syntynyt sähköenergia varastoidaan energiavarastoon. Edelleen jos polttokennosysteemi tuottaa hetkellisesti enemmän sähköenergiaa kuin järjestelmä kuluttaa, ylimääräinen energia voidaan varastoida. Varastoitunut sähköenergia käytetään, kun energian tarve on hetkellisesti suuri esimerkiksi kiihdytystilanteessa. [10, s.434]

Akku varastoi sähköenergiaa sähkökemiallisesti. Akkujen nimellisjännite on tyypillisesti 6 tai 12 V, joten akkuja yhdistetään sarjaan halutun jännitetasen saavuttamiseksi. Polttokennolinja-autoissa käytetään tyypillisesti litiumioniakkuja (Li-ion). Muita akkutyyppejä ovat esimerkiksi lyijyakut ja nikkelimetallihydridiakut (NiMH). Litium on kevyin metalli ja sillä on suuri sähkökemiallinen jännite. Litium reagoi herkästi muiden aineiden kanssa, mikä tekee siitä epävakaa. Tämän takia litium on seostettu muihin aineisiin litiumioniakuissa. Litiumioniakkujen anodi on yleensä grafiittipohjainen ja katodilla käytetään metallioksidia litiumin kanssa. Litiumioniakkuja voidaan ladata ja purkaa nopeammin kuin muita akkutyyppejä.[9, s.150]

Akuilla on tyypillisesti korkea nimellisenergia mutta alhainen nimellisteho. Akkuihin voidaan siis varastoida suuri energiamäärä, mutta ne eivät pysty vastaamaan nopeisiin tehon vaihteluihin. Akkujen elinikä on satoja lataus-purku-syklejä, kun se superkondensaattoreilla voi olla yli miljoona. [54, s. 23]

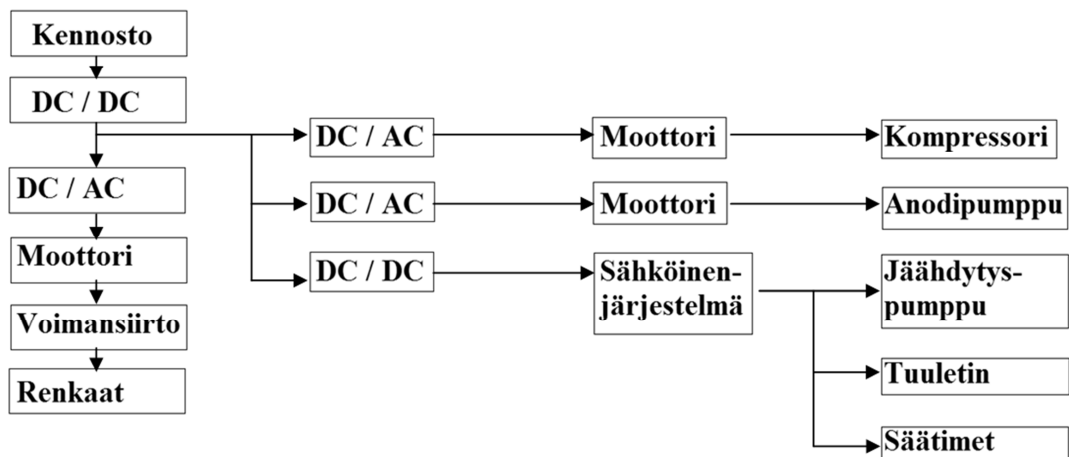
Superkondensaattori on kondensaattori, johon voidaan varastoida tavallista kondensattoria enemmän sähköenergiaa. Superkondensaattori koostuu kahdesta toisistaan eristystä elektrodista. Elektrodit ovat tehty huokoisesta materiaalista, joka on usein aktiivihiiltä tai hiilinanoputkia. Huokoinen materiaali kasvattaa aktiivista pinta-alaa ilman, että kondensaattorin tilavuus kasvaa. Koska yhden superkondensaattorin nimellisjännite on 1–2,8 V, superkondensaattoreita täytyy kytkeä sarjaan suuremman kokonaisjännitteen aikaansaamiseksi.[54, s.24]

Superkondensaattorien nimellisenergia ja energiatiheys ovat tyypillisesti pienempiä kuin akuilla, mutta nimellisteho ja tehoteho ovat suurempia. Superkondensaattorien

lataus-purkaus-sykli on myös huomattavasti parempi kuin akuilla. Superkondensaattorit sopivat käytettäväksi lyhytaikaiseen energianvarastointiin ja tehopiikkien tasaamiseen. Polttokennolinja-autossa superkondensaattorit sopivat jarrutusenergian varastointiin ja ne voidaan purkaa kiihdytyksessä.

5.1.4 Sähkökäyttö

Polttokennolinja-autojen sähkökäytön komponentteja ovat sähkömoottori ja tehoelektroniikka, joka ohjaa ja säätää tehonsiirtoa järjestelmän eri osien välillä. Kuvassa 5.5 on esitetty polttokennolinja-auton voimansiirto. Polttokennolla tuotettua energiaa käytetään sähkömoottorin lisäksi myös BoP-järjestelmässä. BoP-järjestelmän laitteet, kuten kompressorit ja pumput, vaativat myös moottoreita ja niitäkin varten tarvitaan omat muuntimet.



Kuva 5.5 Linja-auton voimansiirto

Sähkömoottori voi olla tasavirralla (Direct Current, DC) tai vaihtovirralla (Alternating Current, AC) toimiva moottori. DC-moottorille polttokennon tuottama tasavirta ohjataan DC/DC-muuntimen kautta. DC/DC-muunnin muuntaa polttokennolta tulevan jännitteen moottorin tarvitsemaan jännitteeseen. AC-moottoria käytettäessä tarvitaan lisäksi DC/AC-muunnin muuntamaan tasavirta vaihtovirraksi. AC-moottorit ovat kuitenkin lähes syrjäyttäneet DC-moottorit, koska ne ovat mekaanisesti kestävämpiä. AC-moottori on myös turvallisempi, kun polttoaineena käytetään vetyä, koska AC-moottorissa ei ole kipinävaaraa. [9, s.136]

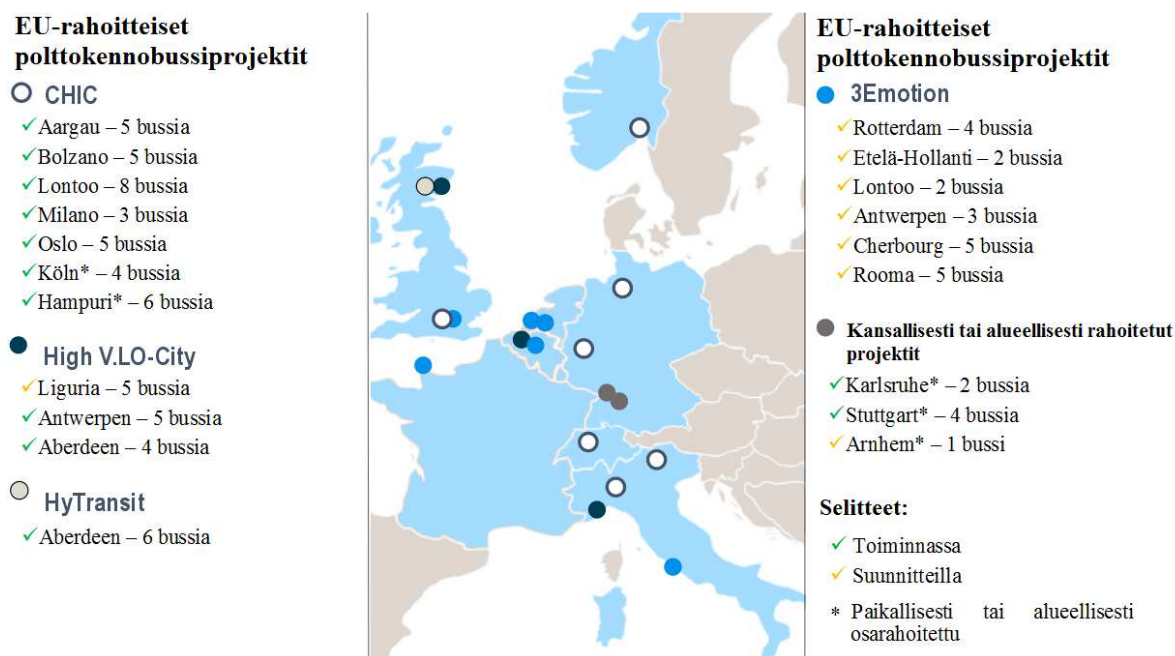
Sähkömoottori voi toimia myös generaattorina, jolloin jarrutusenergia voidaan muuttaa takaisin sähköenergiaksi. Näin saatava sähköenergia varastoidaan akkuihin tai superkondensaattoriin. Sähköenergiavaraston ja moottorin välillä täytyy olla kaksisuuntainen muunnin, joka muuttaa varastosta tulevan jännitteen moottorille sopivaksi ja moottorilta tulevan jännitteen varastolle sopivaksi. Jännitteen kulkeminen polttokennon suuntaan täytyy estää, tai muuten polttokenno voi tuhoutua. [9, s.163]

5.2 Polttokennolinja-autoprojekteja

Ensimmäinen laajamittainen polttokennolinja-autoprojekti oli The Clean Urban Transport for Europe (CUTE), joka alkoi vuonna 2001 ja päättyi 2006. CUTE-projektissa oli mukana 9 eurooppalaista kaupunkia, joissa jokaisessa toimi 3 polttokennolinja-autoa. Tällä hetkellä maailmassa on käytössä noin 100 polttokennolinja-autoa erilaisissa projekteissa. Polttokennolinja-autoja on käytössä Euroopassa, Yhdysvalloissa ja Japanissa.

5.2.1 Eurooppa

Kuvassa 5.6 on esitetty polttokennolinja-autojen sijainnit Euroopassa. Tällä hetkellä Euroopassa on käynnissä 4 isoa polttokennolinja-autoprojektia. Lisäksi joillakin kaupungeilla on omia muutaman linja-auton projekteja.



Kuva 5.6 Eurooppalaiset polttokennolinja-autot [51]

Suurin tällä hetkellä käynnissä oleva polttokennolinja-auto projekti on Clean Hydrogen in European Cities (CHIC). Projektissa on tällä hetkellä mukana 36 linja-autoa seitsemässä Euroopan kaupungissa. CHIC-projekti alkoi vuonna 2010 ja sen on määrä päättyä vuoden 2016 loppuun mennessä. Projektin tarkoituksena on osoittaa polttokennolinja-autojen laaja kaupallinen käyttö. Projektissa on yhteensä ollut mukana 56 polttokennolinja-autoa, joista 20 oli Kanadan Whistlerissä. Kanadassa linja-autot otettiin käyttöön vuonna 2010, jolloin ne liikennöivät Vancouverin olympialaisten aikaan. Whistler sijaitsee Vancouverin pohjoispuolella ja Whistler isännöi olympialaisten alppilajeja. Kanadan osuus projektista päättyi suunnitellusti maaliskuussa 2014. Projektiin kuuluu myös linja-autojen tankkausasemien käyttöönotto. [55]

Taulukossa 5.2 on esitetty CHIC-projektissa mukana olevien polttokennolinja-autojen pääkomponentit. Projektissa on mukana linja-autoja neljältä eri valmistajalta EvoBussilta Saksasta, Van Hoolilta Belgiasta, Wrightbussilta Isosta-Britanniasta ja Solarikselta Puolasta. Polttokennojärjestelmien koot vaihtelevat 75–150 kW nimellistehoaltaan. Wrightbusin Lontoossa toimivat linja-autot ovat ainoita, joissa on sähköisenä varastona superkondensaattorit. Muut valmistajat suosivat litium-ioni-akkuja, joiden tehot ovat 100–250 kW.

Taulukko 5.2 CHIC-linja-autojen pääkomponentit [55]

Linja-autovalmistaja	EvoBus	Van Hool
Polttokennojärjestelmä	120 kW (2 moduulia)	150 kW (1 moduuli)
Akkujärjestelmä	250 kW (Li-ion)	100 kW (Li-ion)
Superkondensaattorijärjestelmä	--	--
Energian talteenottojärjestelmä	Pyörämoottori	Jarruvastukset
Vetyvarasto	7 tankkia, 350 bar ~35 kg	7 tankkia, 350 bar ~35 kg
Kaupungit	Aarau, Bolzano ja Milano	Oslo ja Köln
Linja-autovalmistaja	Wrightbus	Solaris
Polttokennojärjestelmä	75 kW (1 moduuli)	100 kW (1 moduuli)
Akkujärjestelmä	--	120 kW (Li-ion)
Superkondensaattorijärjestelmä	240 kW	--
Energian talteenottojärjestelmä	Jarruvastukset	Ei tietoa
Vetyvarasto	4 tankkia, 350 bar ~33 kg	9 tankkia, 350 bar ~45 kg
Kaupungit	Lontoo	Hampuri

Toinen eurooppalainen polttokennolinja-autoprojekti on High V.LO-City. Projekti alkoi 2012 ja sen on määrä päättyä 2018. Projektin tavoitteena on helpottaa polttokennolinja-autojen nopeaa käyttöönottoa julkisessa liikenteessä ja osallistua vedyn tankkausinfrastruktuurin kehittämiseen. Projektissa on tarkoitus ottaa käyttöön 14 polttokennolinja-autoa kolmessa kaupungissa. Antwerpenissa Belgiassa aloitti vuoden 2014 joulukuussa viisi linja-autoa operoinnin ja Aberdeenissa Skotlannissa neljä linja-autoa vuoden 2015 maaliskuussa. Viiden linja-auton pitäisi aloittaa liikennöinti Ligurian alueella Italiassa vuoden 2016 puolivälissä. Projektiin kuuluu myös vedyn tankkausasemien käyttöönotto. [56]

Aberdeenissa oli jo ennen High V.LO-City projektin neljää linja-autoa käytössä kuusi polttokennolinja-autoa, jotka kuuluvat HyTransit-projektiin. Aberdeenissa on siis yhteensä 10 polttokennolinja-autoa, minkä takia sillä on Euroopan suurin polttokennolinja-autolaivasto. Polttokennolinja-autot ja niiden tankkausasema muodostavat Aberdeenin oman vetylinja-autoprojektin. Vetylinja-autoprojekti taas kuuluu osana H2 Aberdeen -projektiin, jonka tarkoituksena on lisätä vetytaloutta Aberdeenin alueella. [57]

Uusin polttokennolinja-autoprojekti Euroopassa on 3Emotion-projekti. 3Emotionissa otetaan käyttöön 21 uutta polttokennolinja-autoa ja projektiin kuuluu myös kahdeksan olemassa olevaa linja-autoa. Uudet linja-autot on tarkoitus ottaa käyttöön vuoden 2017 aikana. Projektin tarkoituksena on parantaa polttokennolinja-autojen kaupallista potentiaalia ja teknistä saatavuutta. [58]

5.2.2 Pohjois-Amerikka ja Japani

Yhdysvalloissa toimii keväällä 2016 24 polttokennolinja-autoa, joista kolmessa polttokennot ovat apuvoimanlähde. Yhdysvaltojen merkittävin polttokennoprojekti on National Fuel Cell Bus Program (NFCBP). Sen tarkoituksena on edistää polttokennoteknologian kaupallistumista kaupunkibusseissa Yhdysvalloissa. Ohjelmaa hallinnoi kolme yleishyödyllistä järjestöä ja ohjelmaan kuuluu 17 linja-autoa. Linja-autot toimivat San Franciscossa ja Thousand Palmsissa Kaliforniassa, Birminghamissa Alabamassa, Flintissä Michiganissa ja Austinissa Texasissa.

Taulukossa 5.3 on NFCBP-linja-autojen teknisiä tietoja. Projektissa on mukana linja-autoja neljältä valmistajalta, belgialaiselta Van Hoolilta ja yhdysvaltalaisilta ElDoradolta, EVAmericalta ja Proterralta. EVAmerican ja Proterran linja-autojen päävoimalähteenä ovat akut ja polttokennot ovat apuvoimalähteenä. Ohjelman puitteissa on tarkoitus ottaa käyttöön vielä seitsemän linja-autoa, joista kahdessa polttokennot toimivat apujärjestelmänä. [59]

Taulukko 5.3 NFCBP-linja-autojen teknisiä tietoja

Linja-autovalmistaja	Van Hool	ElDorado
Polttokennojärjestelmä	120 kW	150 kW
Akkujärjestelmä	17,4 kWh (Li-ion)	11 kWh (Li-ion)
Päävoimanlähde	Polttokennot	Polttokennot
Kaupungit	San Franciscon alue ja Flint	Thousand Palms
Linja-autovalmistaja	EVAmerica	Proterra
Polttokennojärjestelmä	75 kW	30 kW
Akkujärjestelmä	54 kWh (Litium titaani)	54 kWh (Litium titaani)
Päävoimanlähde	Akut	Akut
Kaupungit	Birmingham	Austin

NFCBP:iin kuulumattomat linja-autot liikennöivät Thousand Palmsissa ja Irvinessä Kaliforniassa, Flintissä Michiganissa, Newarkissa Delawaressa ja New Havenissa Connecticutissa. Delawaren ja New Havenin linja-autojen päävoimalähteenä ovat akut ja polttokennot toimivat apuvoimanlähteinä. Irvinessä ja Newarkissa linja-autot toimivat paikallisten yliopistojen kampusalueella. Yhdysvaltojen kansallinen polttokennotutki-

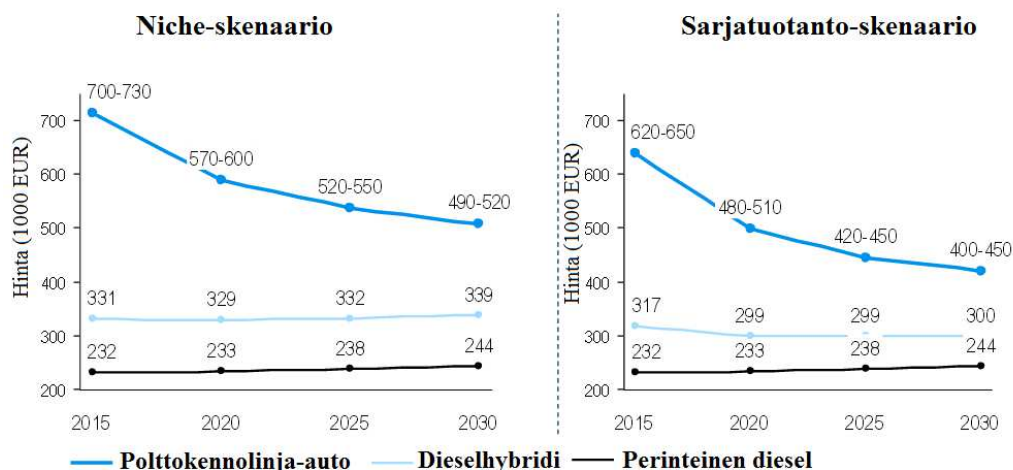
muskeskus (National Fuel Cell Research Center, NFCR) sijaitsee Kalifornian yliopistossa (englanniksi University of California) Irvinessa. [59]

Yhdysvaltain liikenneministeriön (The United States Department of Transportation, DOT) alainen julkisesta liikenteestä huolehtiva virasto Federal Transit Administration (FTA) on aloittanut uuden ohjelman vähäpäästöisten kaupunkilinja-autojen edistämiseksi. Ohjelman nimi on Low or No Emission Vehicle Deployment Program (LoNo) ja siihen kuuluu myös akkukäyttöisiä ja hybridilinja-autoja. Ohjelman aikana on tarkoitus ottaa käyttöön 10 uutta polttokennolinja-autoa, joista viisi tulee käyttöön Kaliforniassa ja viisi Ohiossa. [59]

Japanissa on käytössä viisi polttokennolinja-autoa. Yksi niistä toimii Toytota Cityssä, kaksi Hanedan lentokentällä ja kaksi Chubu Centrairin kansainvälisellä lentokentällä. Nämä polttokennolinja-autot otettiin käyttöön Aichin maailmannäyttelyyn vuonna 2005. Alun perin linja-autot olivat osa Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration –projektia (JHFC). Projekti alkoi vuonna 2002 ja päättyi vuonna 2010. Se tutki polttokennoajoneuvoja ja vetyinfrastruktuuria. Projekti oli Japanin talous- ja teollisuusministeriön (englanniksi Ministry of Economy, Trade and Industry, METI) tukema. JHFC:n päätyttyä linja-autot ovat kuuluneet osaksi HySUT-projektia (The Research Association of Hydrogen Supply/Utilization Technology). HySUT-projektin tarkoituksena on edistää vetyinfrastruktuurin laitteiden kustannusten alenemista, polttokennoautojen yleistymistä ja Japanin kilpailukyvyn paranemista kansainvälisillä polttokennoajoneuvo- ja vetyinfrastruktuurimarkkinoilla. [60]

5.3 Hinta

Polttokennolinja-auton hankintahinta on alentunut noin 75 % ensimmäisten 1990-luvulla valmistettujen prototyypipolttokennolinja-autojen hinnoista. Polttokennolinja-autot ovat edelleen kuitenkin kalliita verrattuna tavallisiin dieselkäyttöisiin linja-autoihin. Polttokennolinja-autojen hinnan odotetaan laskevan polttokennojärjestelmien hinnan laskiessa ja tekniikan kehittyessä. Kuvassa 5.7 on Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) arvio polttokennolinja-autojen hankintahinnan kehityksestä. Niche-skenaariolla tarkoitetaan tilannetta, jossa polttokennolinja-autoja olisi Euroopassa 1200–1800 vuoteen 2025 mennessä. Sarjatuotantoskenaariossa polttokennolinja-autoja täytyy olla 8000–10000 vuoteen 2025 mennessä, mikä tarkoittaa 7-9 % kaikista Euroopan kaupunkibusseista. [51]

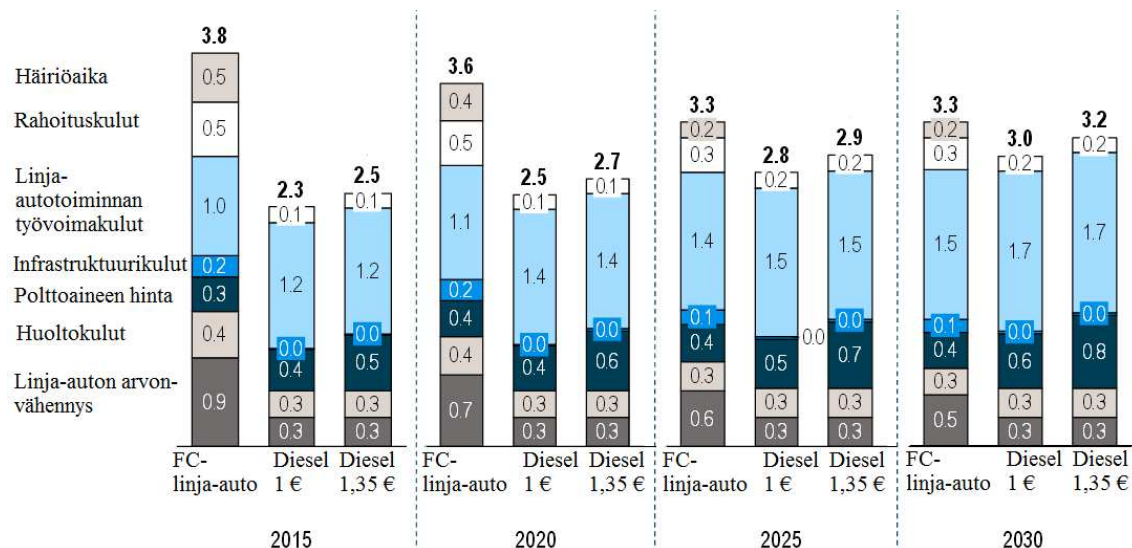


Kuva 5.7 Polttokennolinja-autojen hinnan kehitys [51]

Akkuteknologiassa ja polttokennohenkilöautoissa tapahtuva tekninen kehitys ja ajoneuvojen yleistymisen voi edelleen laskea polttokennolinja-autojen hintoja, mikäli linja-autoissa ja henkilöautoissa voidaan hyödyntää samaa tekniikkaa. Käytännössä se tarkoittaa sitä, että henkilöautoihin tarkoitetut kennostojen pitäisi olla yhtä laadukkaita ja kestäviä kuin linja-autokäyttöön tarkoitetut kennostot ja polttokennojärjestelmät. Jos ajoneuvoissa voidaan käyttää samaa teknologiaa, polttokennolinja-autojen hankintahinta voi olla vuonna 2030 samalla tasolla kuin dieselhybridin hankintahinta eli noin 300 000 euroa. Tällöin polttokennohenkilöautoja pitäisi olla noin 10 000. [51]

Polttokennolinja-auton kannattavuuteen liittyy sen hankintahinnan lisäksi muut kulut, joita ovat huoltokulut, infrastruktuurin sijoittamiseen liittyvät kulut ja toimintakulut. Teknologian tullessa tunnetummaksi polttokennolinja-autojen huoltokulujen oletetaan saavuttavan diesellinja-autojen kanssa saman tason vuoteen 2020 mennessä. Infrastruktuurin eli lähinnä vetytankkausasemien investointikulujen odotetaan vähenevän 24 %, jos vetyä ei tuoteta paikan päällä ja 39 %, jos vety tuotetaan elektrolyysillä tankkausasemalla. [51]

Polttokennojen kokonaiskustannuksiin vaikuttaa myös esimerkiksi polttoainekulut ja rahoituskulut. Kokonaiskulujen avulla voidaan arvioida polttokennolinja-auton taloudellista kannattavuutta diesellinja-autoihin nähden. Kuvassa 5.8 on FCH JU:n arvio polttokennolinja-autojen hintakehityksestä diesellinja-autoihin verrattuna sarjatuotantoskenaariossa. Kokonaiskustannuksiin on otettu mukaan häiriöajasta johtuvat kustannukset. Häiriöaika on aika, jolloin linja-autoa ei voi käyttää uudesta teknologiasta johtuvien ongelmien takia. Infrastruktuurikuluilla tarkoitetaan vetytankkausasemien rakentamisesta syntyviä kuluja. [51]



Kuva 5.8 Polttokenno- ja diesellinja-autojen kokonaiskustannusten vertailu (EUR/km) [51]

Polttokennolinja-autojen kokonaiskustannukset olivat vuonna 2015 3,8 euroa kilometriä kohden ja vuonna 2030 niiden arvioidaan oleva 3,3 euroa kilometriltä. Tarkasteluun on otettu diesellinja-autojen kokonaiskulut, kun dieselin hinta on 1 euroa litralta ja kun se on 1,35 euroa litralta. Jos dieselin hinta on 1,35 euroa / litra, polttokennolinja-auton ja diesellinja-auton kokonaiskustannukset ovat lähes samat vuonna 2030. Tarkastelussa on oletettu, että vety on verotonta. Polttokennolinja-autot tulevat entistä kannattavimmaksi, jos vähäpäästöisiä kulkuneuvoja päätetään tukea rahallisesti tai jos dieselin hinta nousee verotuksen tai muiden syiden takia. Toisaalta jos vetyä päätetään verottaa ja dieselin hinta pysyy alhaisena, polttokennolinja-autojen taloudellinen kannattavuus diesellinja-autoihin nähden heikkenee.

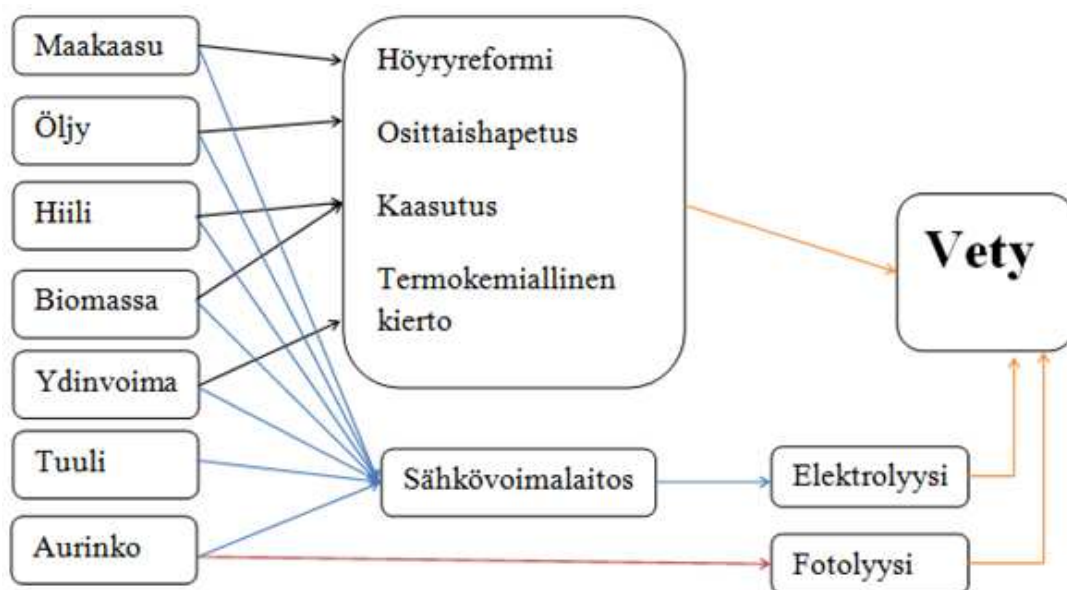
6. VETY LIIKENTEEN POLTTOAINEENA

Tärkeä elementti vetykäyttöisten polttokennoajoneuvojen yleistymisen kannalta on toimivan vetyinfrastruktuurin luominen. Vetyinfrastruktuurilla tarkoitetaan vedyn tuotantoa, kuljetusta, varastointia ja tankkausasemia. Vety on universumin yleisin alkuaine, mutta sitä ei esiinny Maapallolla sellaisenaan. Vety on aina sitoutuneena yhdisteissä ja siksi vetyä täytyy valmistaa esimerkiksi vedestä tai hiilivedyistä. Vedyn tuotanto voi tapahtua keskitetysti suurissa tuotantolaitoksissa tai paikallisesti tankkausasemalla. Vedyn tuotantotapa vaikuttaa sekä vedyn puhtauteen että tuotannosta aiheutuviin hiilidioksidipäästöihin.

6.1 Vedyn tuotanto

Vedyn tuotanto on pitkään tunnettu ja kauan käytössä ollut teknologia. Vetyä käytetään teollisuudessa erityisesti ammoniakkin ja lannoitteiden valmistukseen, öljynjalostukseen ja metallin karkaisuun. Suomessa vedyn suurin tuottaja on Neste Oil Oyj, joka myös käyttää kaiken tuottamansa vedyn omiin öljynjalostusprosesseihinsa. [2]

Vetyä voidaan valmistaa mistä tahansa vetyatomeja sisältävästä aineesta. Kuvassa 6.1 on esitetty vedyn eri valmistustapoja ja lähtöaineita. Yleisimmin vetyä tuotetaan hiilivedyistä, kuten maakaasusta tai öljystä, termisin eli lämpöä vaativin menetelmin. Hiilivetyjä käytettäessä ilmakehään vapautuu hiilidioksidia. Toinen tapa tuottaa vetyä on hajottaa vettä elektrolyytisellä menetelmällä. Elektrolyytisessä menetelmässä käytetyn sähköenergian tuotantotapa vaikuttaa suuresti vedyn tuotannon hiilidioksidipäästöihin. Tuuli- ja aurinkovoimalla tuotettu sähköenergia voidaan varastoida elektrolyysin avulla vedyn kemialliseksi energiaksi. Kun vety tuotetaan uusiutuvalla energialla tuotetun sähköön avulla, tuotannosta ei synny hiilidioksidipäästöjä. Auringon säteilyenergiaa voidaan käyttää myös suoraan vedyn valmistukseen fotolyytisellä menetelmällä.



Kuva 6.1 Vedyn valmistustapoja

Merkittävin osa vedyn tuotannosta tapahtuu hiilivetyjen, erityisesti maakaasun, höyryreformoinnilla. Maakaasun, joka on pääasiassa metaania, höyryreformoinnissa kaasusta poistetaan ensiksi rikki. Tämän jälkeen tapahtuu varsinainen höyryreformointi, jossa metaaniin yhdistetään vesihöyryä, jolloin nikkelikatalyytin avulla tapahtuu reaktio



Tämän reaktion jälkeen tapahtuu vielä vesikaasun konvertointireaktio (water-gas shift reaction), jossa syntynyt hiilimonoksidi reagoi vesihöyryn kanssa



jolloin muodostuu lisää vetyä ja hiilidioksidia. Lopuksi vety puhdistetaan. Höyryreformointi tapahtuu yleensä 800–900 °C lämpötilassa ja 1–3 bar paineessa. [9, s.37]

Toinen terminen menetelmä valmistaa vetyä on osittainen hapetus. Siinä polttoaine reagoi hapen kanssa. Osittaista hapetusta käytetään yleensä, kun vetyä halutaan valmistaa raskaammista hiilivedyistä, kuten öljystä. Osittaista hapetusta voidaan kuitenkin käyttää monien eri polttoaineiden kanssa. Metaanilla osittaisessa hapetuksessa tapahtuva reaktio on



Syntävä hiilimonoksidi reagoi vesikaasun kanssa yhtälön (6.2) mukaisesti. Osittainen hapetus tapahtuu yleensä 800 – 1000 °C lämpötilassa. [5, s.456]

Vetyä voidaan valmistaa myös kaasutuksella. Kaasutuksessa kiinteä polttoaine, esimerkiksi hiili, reagoi vesihöyryn ja hapen kanssa. Kaasutuslämpötila on yli 700 °C ja paine yli 60 bar. Jos lämpötila on yli 1000 °C, syntyy enemmän vetyä, koska CO reagoi vesihöyryn kanssa reaktio (6.2) mukaisesti. Kaasutuksessa voidaan käyttää polttoaineena myös biomassaa. [61]

Vetyä voidaan tuottaa sähkökemiallisesti vedestä elektrolyysillä. Elektrolyysimenetelmä on vastakkainen polttokennossa tapahtuvalle reaktiolle. Veteen johdetaan sähkövirtaa, jolloin vesi pelkistyy katodilla reaktion (6.4) mukaisesti



Anodilla happi hapettuu ja reaktio on



Tällöin elektrolyysin kokonaisreaktio on



Alkalinen elektrolyysi on vanhin elektrolyysimenetelmä. Siinä elektrolyytinä on kaliumhydroksidi. Uudempia teknologioita ovat kiinteä polymeerielektrolyysi ja korkean lämpötilan vesihöyryelektrolyysi, joiden reaktiot ovat vastakkaiset PEMFC:n ja SOFC:n reaktioille.

Elektrolyysillä valmistettu vety on verrattain puhdasta. Jos elektrolyysissä käytettävä sähkö on tuotettu uusiutuvalla energialla, vedyn tuotannosta ei aiheudu hiilidioksidipäästöjä. Menetelmä vaatii kuitenkin paljon sähköenergiaa ja sen kannattavuus muihin tuotantotapoihin on verrannollinen sähkön hintaan ja saatavuuteen suhteessa fossiilisiin polttoaineisiin. [2]

Vetyä voidaan valmistaa myös termokemiallisin, fotolyttisin ja biologisin menetelmin. Termokemiallisessa reaktiossa vesi hajotetaan korkeassa lämpötilassa vety- ja happimolekyyleiksi. Hajotakseen vesihöyryn lämpötilan täytyy olla yli 2500 °C, mutta lämpötilaa voidaan alentaa käyttämällä katalyyttejä. Fotolyysissä hyödynnetään auringon säteilyenergiaa vedyn tuottamiseen suoraan vedestä. Biologisissa menetelmissä käytetään leviä tai bakteereita tuottamaan vetyä. Nämä vedyntuotantotavat ovat kuitenkin vasta tutkimusasteella, eikä niitä ole kaupallisessa käytössä. [61]

Vetyä syntyy myös monen teollisuuden prosessin sivutuotteena. Suomessa esimerkiksi Kemira Chemicals Oy:n natriumkloraatin valmistuksessa syntyvää ylijäämävetyä käytetään kaukolämmön tuotantoon [62]. Koko Euroopassa arvioidaan syntyvän 2 – 10 mil-

jardia Nm^3 vetyä teollisuuden sivutuotteena. Tämä vetymäärä kattaisi 1–6 miljoonan polttokennoajoneuvon vuotuisen kulutuksen [63]. Suomessa syntyvällä ylimäärävedyllä voisi tankata 10000 henkilöautoa tai 83 linja-autoa vuodessa [4].

6.2 Vedyn kuljetus

Kun vetyä ei tuoteta tankkausasemalla, se voidaan kuljettaa paikan päälle nestemäisenä tai kaasuna säiliökuljetuksena tai pumpata kaasuna putkistoa pitkin. Taulukossa 6.1 on vertailtu vedyn eri kuljetustapoja.

Taulukko 6.1 Vedyn kuljetustapojen vertailu [64]

	Säiliökuljetus		
	Kaasuna	Nesteytettynä	Putkistossa
Kapasiteetti	Pieni	Kohtalainen	Suuri
Kuljetusmatka	Lyhyt	Pitkä	Pitkä
Energiahäviöt	Pieni	Suuri	Pieni
Kiinteät kulut	Pieni	Kohtalaiset	Suuri
Muuttuvat kulut	Suuri	Kohtalaiset	Pieni

Kaasumaisena vety kuljetetaan pääsääntöisesti putkipaketteina tai kontteina 200–300 bar paineessa. Kuljetusastia voi toimia tankkausasemalla myös vedyn varastona. Kaasumaisen vedyn säiliökuljetuksen investointikulut ovat pienet. Kuljetuskapasiteetti on kuitenkin pieni ja muuttuvat kulut suuret. Kuljetusmäärän kasvaessa tarvitaan enemmän kuljetuskalustoa, henkilökuntaa ja polttoainetta. Vedyn säiliökuljetus paineistettuna kaasuna on taloudellisesti kannattavaa, jos vedyn tarve tankkausasemalla on pieni, korkeintaan 400 kg päivässä ja kuljetusmatka ei ole suuri. [65, s.34]

Maantiekuljetuksissa on tehokkaampaa kuljettaa vety nesteytettynä. Nesteytettynä vetyä voidaan kuljettaa suurempia määriä kuin kaasuna, koska nesteytetyn vedyn energiatiheys on suurempi kuin kaasun. Suuremman kuljetuskapasiteetin ansiosta nesteytetyn vedyn kuljetusmatkat voivat olla pidempiä kuin kaasumaisen vedyn eikä kuljetusmatkalla ole yhtä suurta vaikutusta kokonaiskuluihin. Nestemäisen vedyn käsittelyn haasteena on sen kryogeeninen lämpötila. Vedyn nesteytys on kallista ja nesteytettynä se täytyy kuljettaa ja säilyttää hyvin eristetyissä säiliöissä. Hyvästä eristeestä huolimatta osa varastoidusta nestemäisestä vedystä muuttuu vähitellen kaasuksi. Kaasu on kuitenkin teknisesti mahdollista ottaa talteen, jolloin sekin saadaan hyödynnettyä. [65, s.33–34]

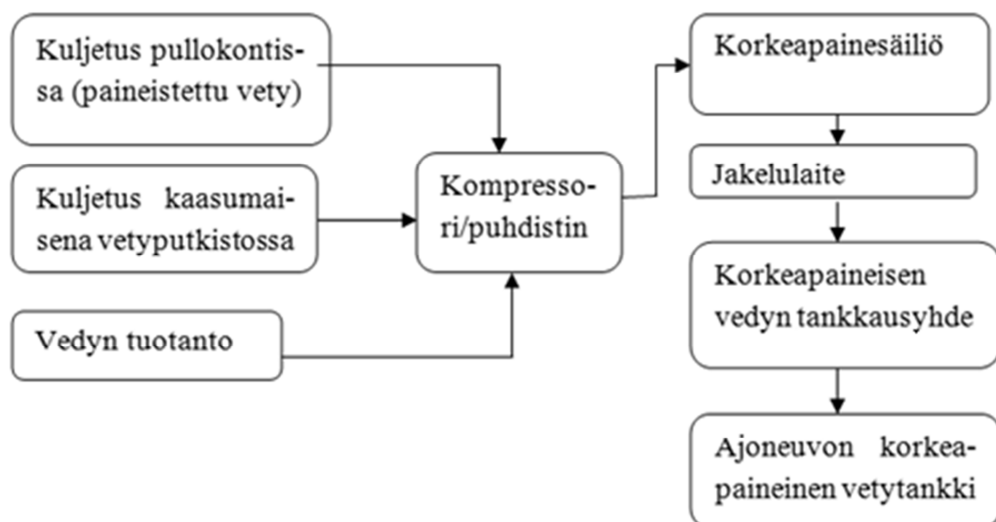
Putkistoissa vetyä voidaan kuljettaa suurella, 900–1000 bar paineella. Putkistot mahdollistavat suurten vetymäärien kuljetuksen. Euroopassa on noin 1600 km vetyputkistoa vedyn suurkäyttäjää varten. Vetyputkiston rakentaminen on kallista, koska vedylle soveltuvat materiaalit ovat kalliita. Toisaalta kun putkisto on kerran rakennettu, sen muuttuvat kulut ovat hyvin pienet. Vetyputkistoverkon rakentaminen onkin taloudellisesti

kannattavaa, kun vedyn tankkausasemien verkosto on tiheä ja päivittäinen vedyn tarve on suuri. [65, s.34]

6.3 Vedyn tankkaus

Vedyn tankkausasema voi olla oma erillinen yksikkönsä tai vedyn tankkaus voi olla yhdistettynä tavallisella tankkausasemalla. Vety voidaan tuottaa tankkausasemalla veden elektrolyysillä tai maakaasusta reformoimalla tai se voidaan kuljettaa suuremmista tuotantolaitoksista. Linja-auton tankkaus kestää tyypillisesti noin 10 minuuttia, mutta tankkausajat voi vaihdella viiden ja 20 minuutin välillä. Diesellinja-auton tankkaus kestää noin viisi minuuttia. [66]

Vety voidaan tankkata joko kaasumaisena tai nesteytettynä. Suurin osa uusista tankkausasemista on kaasumaisen vedyn tankkausasemia, koska autoteollisuus on päättänyt keskittyä käyttämään kaasumaista vetyä polttokennoajoneuvojen polttoaineena. Kaasumaisen vedyn tankkaus perustuu paine-eroon. Kuvassa 6.2 on esitetty kaasumaisen vedyn tankkausaseman periaatekuva. Tankkausasemalla kompressorit nostavat vedyn paineen tankkauksen vaatimaan paineeseen. Jos ajoneuvon maksimi täyttöpaine on 350 bar, niin paine vetyaseman korkeapainesäiliössä on 400–500 bar ja ajoneuvon maksimi täyttöpaineen ollessa 700 bar on korkeapainesäiliön paineen oltava 850–1000 bar. Vedyn lämpötila nousee korkeapaineisen tankkauksen yhteydessä, jonka takia tankkausasemalla on vedyn esijäähdytysjärjestelmä. Sen tehtävänä on varmistaa, ettei sallittuja vedyn lämpötila- ja painerajoja ylitetä. Jakelulaite annostelee vedyn määrää, joka tankataan tankkausyhteen ollessa yhdistettynä ajoneuvoon. [67]

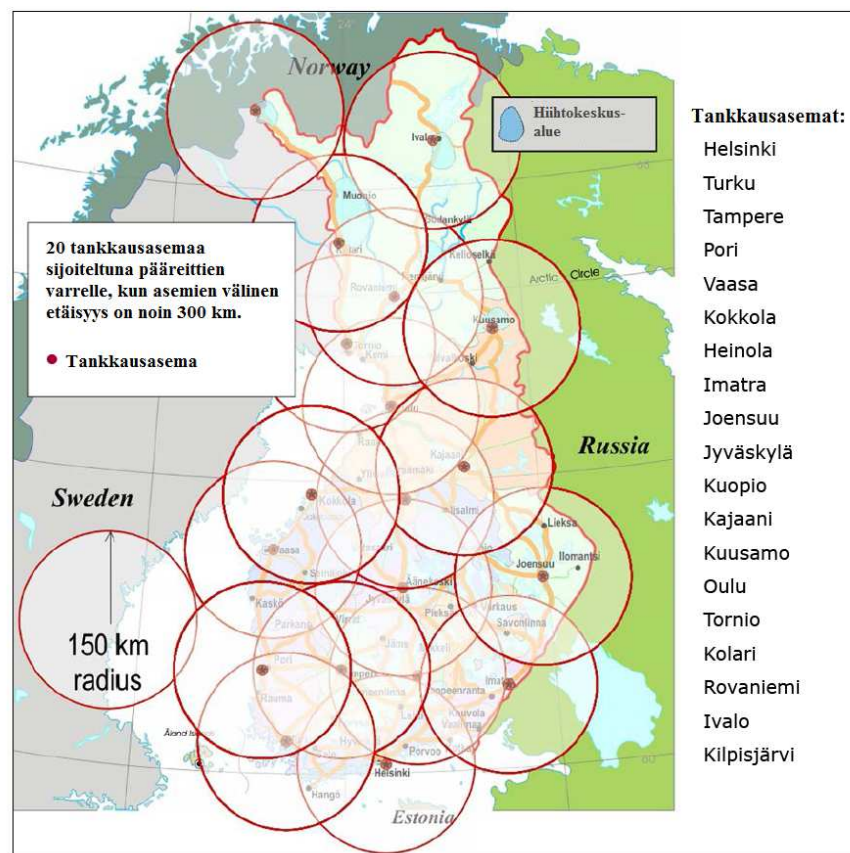


Kuva 6.2 Kaasumaisen vedyn tankkaus [67]

Nestemäisen vedyn tankkausasemilla vety on varastoituna joko maan päälle tai alle hyvin eristetyssä säiliössä. Vetyvarastosta vety pumpataan vedyn jakelijan kautta ajoneuvoon. Vety voidaan varastoida nestemäisenä vaikka se tankattaisiin kaasumaisena. Tällöin nestemäinen vety täytyy höyrystää. Nestemäisen vedyn säiliössä tapahtuu joka tapauksessa jatkuvasti höyrystymistä. Höyryvety täytyy joko poistaa ja esimerkiksi paineistaa korkeapaineisen vedyn varastoon tai nesteyttää uudelleen. Jos näin ei tehdä, paine kasvaa vetyvarastossa liian suureksi. Ajoneuvon tankkaajan näkökulmasta vetyajoneuvon tankkaus ei eroa perinteisiä polttoaineita käyttävän ajoneuvon tankkauksesta. [65, s.34]

6.4 Tankkausasemaverkosto

Suomessa on kaksi vedyn tankkausasemaa. Toinen on Helsingin Vuosaarella ja toinen Mäntyharjulla. Vetytankkausasemien vähyys on yksi hidaste vetyajoneuvon yleistymiselle. Toisaalta tankkausasemien rakentaminen ei ole kannattavaa, jos vetyajoneuvojen määrä on hyvin pieni. Suomen liikenne- ja viestintäministeriön ehdotuksessa vaihtoehtoisten käyttövoimien jakeluverkoksi asettaa tavoitteeksi vuodelle 2030, että Suomessa olisi vähintään 20 vedyn tankkausasemaa. Kuva 6.3 on esimerkkiehdotus siitä, miten tankkausasemat voisivat sijaita. Tankkausasemien väli on korkeintaan 300 km ja ne sijaitsevat pääreittien varrella.[4]



Kuva 6.3 Esimerkkiehdotus Suomen tankkausasemaverkostolle vuonna 2030 [2]

Vuoden 2020 tavoitteena on, että vetyasemia olisi vähintään 6 kappaletta isoimmissa kaupungeissa. Yhden aseman tulisi palvella noin 100 autoa. Euroopassa on tällä hetkellä yhteensä noin 90 vetytankkausasemaa. Kuva 6.4 on Euroopan toiminnassa olevat vetytankkausasemat vuoden 2016 maaliskuussa.



Kuva 6.4 Euroopan vetytankkausasemat [68]

Kattavan vetytankkausverkoston rakentaminen on välttämätöntä vetyajoneuvojen yleistymisen kannalta. Tankkausverkostoja on rakennettu jo Saksaan, Kaliforniaan, Japaniin ja Koreaan.

7. POLTTOKENNOLINJA-AUTON HYÖDYNTÄMINEN TAMPEREELLA

Tampereen joukkoliikennettä hallinnoi Tampereen kaupunki ja se vastaa Tampereen, Ylöjärven, Nokian, Kangasalan, Lempäälän, Pirkkalan, Oriveden ja Vesilahden joukkoliikenteen suunnittelusta. Tampereen joukkoliikenne toimii tilaaja-tuottaja-periaatteella. Tilaaja-tuottaja-periaate tarkoittaa sitä, että Tampereen kaupungin sisäisen joukkoliikenteen tilaaminen ja tuottaminen on erotettu toisistaan. Joukkoliikenteen tilaajayksikön tehtäviin kuuluu muun muassa linjojen ja aikataulujen suunnittelu, lippujen myynti, tukipalveluiden kehittäminen, yhteistariffiliikenteen taloudellinen selvitys sekä joukkoliikenteen tiedotus ja markkinointi. Joukkoliikenneyksikön tilaaja määrittää palvelutason ja hankkii tarvittavat palvelut tuottajilta. Lipputuloista aiheutuva riski on tilaajalla. [69]

Palvelun tuottajan tehtäviin kuuluu liikenteen ajaminen ja kuljettajien työvuorojen soveltaminen ajamiensa linjojen aikatauluihin. Tuotantosopimus sisältää kriteerit palvelun ja kaluston laadulle. Tuottaja saa korvauksen ajettujen linjakilometrien, linjatuntien ja autopäivien perusteella. Talvikaudella 2015–2016 Tampereen joukkoliikenteen tuottajia ovat Tampereen Kaupunkiliikenne Liikelaitos (TKL), Väinö Paunu Oy, Länsilinjat Oy, Satakunnan Liikenne Oy, Pirkanmaan Tilausliikenne Oy ja Tilausliikenne Lauri Möttö Ky. [70]

Suurimman osan Tampereen seudun joukkoliikenteestä liikennöi TKL, joka on Tampereen kaupungin omistama linja-autoliikenteen tuottaja. TKL:n kalustoon kuuluu noin 140 linja-autoa. Linjaliikenneautot ovat matalalattiaisia Volvoja, Solariksia ja Scanioita. TKL otti vuonna 2012 käyttöönsä kaksi Solaris Urbino Hybrid linja-autoa, joissa on sekä dieselmoottori että sähkömoottori. TKL on myös suunnitellut ottavansa käyttöön yhdessä tai erikseen Tampereen Kaupungin kanssa akkusähkökäyttöisiä kaupunkilinja-autoja. [71]

7.1 Polttokennolinja-autoprojektin vaiheet

Polttokennolinja-auto projektin eteneminen voidaan jakaa neljään vaiheeseen, jotka ovat projektin aloitus, hankinnan esivalmistelut, hankinta ja käyttöönotto. Projektin aloitusvaiheessa on luotava ryhmä yhteistyökumppaneista, jotka sitoutuvat projektiin sekä viranomaisista, jotka tukevat projektia ja joilla on päätäntävaltaa. Aloitusvaiheessa on syytä tehdä kokonaiskustannusten arviointi. Kokonaiskustannuksista on syytä tehdä tapaustutkimus, jossa käsitellään perusteellisesti projektista aiheutuvia kustannuksia,

etuja sekä muita näkökulmia. Aloitusvaiheessa projektille laaditaan budjetti. Budjetin laadinnan yhteydessä määritetään kustannusten jako eri toimijoiden kesken sekä selvitetään projektiin mahdollisesti saatava tukirahoitus. Eurooppalaisella tasolla rahoitusta voi saada esimerkiksi FCH JU:n kautta, joka tukee polttokenno- ja vetyprojekteja Horisontti 2020 -ohjelman puitteissa. Horisontti-hankkeen valmisteluihin voi saada rahoitusta Tekesiltä [72]. EU rahoitusta voi saada myös Connecting Europe Facility (CEF) – hankkeen puitteissa. Lisäksi pitää selvittää, mitä kansallisia tai paikallisia rahoituksia on mahdollista saada.

Aloitusvaiheeseen kuuluu myös linja-auto- ja polttokennovalmistajien sekä tankkausinfrastruktuurin tarjoajien arviointi. Aloitusvaiheessa on syytä tutustua eri valmistajien tuotteisiin sekä käydä keskustelua valmistajien kanssa heidän tuotteidensa soveltuvuudesta juuri tähän projektiin. Polttokennolinja-autoja valmistaa esimerkiksi Van Hool, Solaris ja EvoBus. Vedyn tankkausinfrastruktuurin toimittajia ovat esimerkiksi Air Liquide, Linde ja Woikoski. [73]

Aloitusvaiheen jälkeen aloitetaan hankinnan esivalmistelut. Hankinnan esivalmisteluvaiheessa tutustutaan toiminnan kannalta olennaisiin lakeihin ja säädöksiin, nimitetään projektin johtoryhmä, luodaan projektisuunnitelma ja kirjataan mahdollisia riskejä. Projektisuunnitelmassa pitää olla projektin tarkka kuvaus, josta käy ilmi esimerkiksi projektin aikataulu ja tavoitteet. Suunnitelmassa pitää olla myös yksityiskohtainen pohdinta linja-auton reittivalinnasta, reitin pituudesta, pysäkkien lukumäärästä ja vuorovälistä. Lisäksi suunnitelmassa pitää olla yleiskuvaus käytetystä teknologiasta ja linja-auton ja tankkausaseman huoltostrategiasta. Projektisuunnitelmassa pitää olla myös varasuunnitelma, jos jokin osa projektista viivästyy tai epäonnistuu. [73]

Laitteiston hankintaa varten tehdään tarjousasiakirja, josta selviää tarkat ja yksityiskohtaiset vaatimukset polttokennolinja-autolle ja tankkausasemalle. Tarjousvaiheessa on myös varmistettava, että valittava linja-auto ja tankkausasema ovat yhteensopivat laitteistoltaan ja toimintaperiaatteeltaan. Lisäksi on huolehdittava, että polttoaineena käytettävä vety on laadultaan linja-autoon sopivaa ja sen hiilijalanjälki on haluttu eli saako vedyn tuottamisesta aiheutua hiilidioksidipäästöjä. [73]

Käyttöönottovaiheessa täytyy varmistaa riittävä ja käytännönläheinen koulutus henkilökunnalle. Kaikille linja-auton kanssa tekemisissä oleville on syytä kertoa turvallisuuskäsitteitä. Lisäksi on hyvä korostaa projektin demonstratiivista luonnetta ja uuden teknologian käyttöönottoon liittyviä haasteita. Linja-autoliikennöitsijän ja -toimittajan välinen vuorovaikutusyhteys on varmistettava, jotta odottamattomat ongelmat ja päivittäiseen huoltoon liittyvät asiat saadaan hoidettua nopeasti. Lisäksi on varmistettava linja-autonkuljettajien ja huoltohenkilökunnan tekninen osaaminen. [73]

7.2 Vedyn tuotanto ja tankkaus

Vetylinja-autot tarvitsevat polttoaineekseen vetyä. Vety voidaan tuottaa joko tankkausasemalla tai kuljettaa paikan päälle keskitetystä vedyn tuotantolaitoksesta. Yksi polttokennolinja-auto käyttää vetyä päivässä 30–50 kg. Tankkausasemilla on yleensä vähintään yhden päivän varasto polttoainetta, joten tankkausasemien koot alkavat yleensä 100 kg vetyä päivässä sisältävistä asemista. Tankkausasemat ovat yleensä modulaarisia eli niiden kokoa voidaan tarvittaessa kasvattaa, jos polttokennolinja-autojen lukumäärä kasvaa.

Suurin osa eurooppalaisista polttokennolinja-autojen tankkausasemista tuottaa vedyn paikan päällä elektrolyysillä. Elektrolyysillä tuotettu vety on puhdasta ja soveltuu siten hyvin ajoneuvosovelluksiin. Elektrolyysillä tuotettuun vetyyn tarvitaan sähköä ja vettä. Sähkö voidaan tuottaa täysin uusiutuvista energialähteistä, jolloin vetylinja-auton kokonaispäästöt ovat pienimmät mahdolliset. Uusiutuvalla energialla tuotettu sähkö voidaan tuottaa itse aurinkopaneeleilla tai ostaa markkinoilta. Aurinkopaneelit lisäävät kuitenkin kokonaisinvestointikuluja ja aurinkoenergian epätasainen saatavuus lisää järjestelmän epävarmuutta. Monet sähköenergian myyjät tarjoavat täysin uusiutuviin energialähteisiin perustuvia tuotteita. [66]

Elektrolyysitankkausaseman laitteistoon kuuluu yksi tai useampi elektrolysoimislaite, vetyvarasto, yksi tai useampi kompressori ja jakelija. Jos elektrolysoimislaite tai kompressori hajoaa, vetyä ei saada tuotettua ja tankattua. Tämän takia asemalla on hyvä olla näille komponenteille varalaitteet. Toinen varautumiskeino on tuoda osa vedystä paineistettuna paikan päälle suuremmasta tuotantolaitoksesta. Kun kaikkea vetyä ei tuoteta tankkausasemalla, tankkausaseman investoinnit ovat tyypillisesti pienemmät kuin jos kaikki tuotetaan paikan päällä. Kun noin 60 % vedystä tuodaan muualta, tankkausaseman investointikulut ovat noin 800 000 euroa 100 kg vetyä päivässä tarvitsevalla asemalla. Jos kaikki vety tuotetaan asemalla, samankokoisen aseman investointikulut ovat noin 1 300 000–1 900 000 euroa. [74]

Tampereella ei ole vetyä sivutuotteenaan synnyttävää teollisuutta. Lähin teollisuuslaitos, jossa syntyy vetyä, on Kemira Chemicalsin toimipiste Sastamalassa. Kemira Chemicalsin Sastamalan ja Joutsenon toimipisteissä syntyvän ylimäärävedyn myynnistä vastaa Woikoski Oy. Woikoskella on myös omaa vedyn tuotantoa. Vetyä myy Suomessa myös Linde-konserniin kuuluva AGA. Vety voidaan toimittaa tankkausasemalle paineistetuissa kaasusäiliöissä, jotka toimivat myös vetyvarastona. Tankkausaseman laitteistoon kuuluu myös kompressori ja jakelija. Kun vety on valmiiksi paineistettu, kompressori ei ole välttämätön. Kun vedyn päivittäinen tarve on 100 kg, vetytankkausaseman investointikulut ovat noin 530 000–710 000 euroa [74].

Kolmas tapa hankkia vetyä Tampereella voisi olla vedyn tuottaminen kaatopaikkakaasusta. Kaatopaikkakaasun tilavuudesta on tyypillisesti 55–65 % metaania, 35–45 til.-%

hiilidioksidia ja 0-2 til.% happea. Lisäksi kaasu sisältää pieniä määriä muita yhdisteitä. Kaatopaikkakaasua syntyy eloperäisen aineen hajotessa hapettomissa olosuhteissa kaatopaikalla. [75]

Tampereella kaatopaikkakaasua kerätään Tarastenjärven jätteenkäsittelykeskuksessa. Tarastenjärven jätteenkäsittelykeskuksessa on kaksi kaasunkeräyslinjastoa, jotka kattavat pääosan kaatopaikka-alueesta. Kaasu johdetaan kaasumootorigeneraattorille, joka tuottaa sähköä ja lämpöä jätteenkäsittelylaitokselle. Oman tarpeen ylittävä sähkö myydään sähköverkkoon. Vuonna 2014 kaasua pumpattiin 2,6 milj. m³, josta hyötykäyttöön saatiin 1,7 milj. m³. Hyödyntämättä jäänyt kaasu poltetaan soihdussa. [76]

Kaatopaikkakaasua on hyödynnetty Suomessa polttokennoissa vuoden 2008 asuntomesualueella Vaasan Suvilahdessa. Suvilahden käytöstä poistetulta ja maisemoidulta kaatopaikalta kerättiin kaasua, joka tuotti sähköä ja lämpöä SOFC-yksikössä. SOFC-yksikkö toimintalämpötila on korkea, noin 800 °C, minkä takia kennossa tapahtuu sisäinen reformaatio. Sisäisessä reformaatiossa metaani muuttuu hiilimonoksidiksi ja vedyksi. Kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus vaihtelee, joten järjestelmään kuului ohjausjärjestelmä kaasun vaihtelevan koostumuksen hallintaan. Kaatopaikkakaasu sisältää myös erilaisia epäpuhtauksia, kuten rikki- ja klooriyhdisteitä, jotka täytyy poistaa polttoaineesta ennen polttokennoon syöttämistä. [77]

Kokemuksia kaatopaikkakaasun hyödyntämisestä ajoneuvosovelluksiin tarkoitetun vedyn tuotannossa on maailmalla vain vähän. Yhdysvalloissa, Etelä-Carolinassa BMW:n tehtaalla on ollut kokeilu, jossa läheisen kaatopaikan kaasuista on tehty vetyä polttokennotrukkien käyttöön. Vety tuotettiin kaatopaikkakaasun metaanista höyryreformilla, jonka jälkeen se puhdistettiin polttokennoille sopivaksi. [78]

Höyryreformi tarvitsee tapahtuakseen korkean, noin 800 °C, lämpötilan. Matalaan lämpötilan PEM-kennoissa ei tapahdu sisäistä reformointia, joten kaatopaikkakaasu täytyy reformoida ulkoisessa yksikössä. PEM-kenno ei siedä hiilimonoksidia. PEM-kennon platinakatalyytti myrkyttyy hiilimonoksidista ja sen pitoisuus pitää olla alle 10 ppm. Varsinaisen höyryreformoinnin jälkeen tapahtuva vesikaasun konvertointireaktio täytyy toistaa useamman kerran, jotta hiilimonoksidipitoisuus polttoaineessa pienenee. Konvertointireaktion jälkeenkin hiilimonoksidipitoisuus on yleensä liian iso PEM-kennolle. Hiilimonoksidipitoisuus voidaan pienentää selektiivisellä hapetusreaktiolla, metanoinnilla, palladium- tai platinamembraanilla tai paineenvaihteluadsorptiolla (Pressure swing adsorption, PSA). Vedyn puhdistamiseen tarvittava laitteisto lisää kokonaisjärjestelmän hintaa ja monimutkaisuutta. [79]

Selektiivisessä hapetusreaktiossa polttoainevirtaan lisätään pieni määrä ilmaa, joka johdetaan jalometallikatalyytille. Katalyytti absorboi hiilimonoksidia ja reagoi ilmassa olevan hapen kanssa. Korkeassa lämpötilassa hiilimonoksidi, vety ja ilma voivat muodostaa räjähtävän seoksen, jonka syntyminen pitää estää. Metanointi vähentää vaarallisen

kaasuseoksen syntymistä. Metanointi on vastakkainen reaktio reaktiolle (6.1). Metanoinnissa hiilimonoksidi reagoi vedyn kanssa synnyttäen metaania ja vettä. Metanointi tapahtuu noin 200 °C lämpötilassa. Metanointimenetelmässä kuluu vetyä, mikä laskee kokonaishyötysuhdetta. Metanointimenetelmällä hiilimonoksidipitoisuus saadaan kuitenkin laskettua alle 10 ppm. Palladium- ja platinamembraaneja on käytetty jo vuosia erittäin puhtaan vedyn tuottamiseen. Membraani on tyypillisesti metallinen putki, jonka kidehilan läpi pääsee vain yksiatominen vety. Järjestelmä on kuitenkin erittäin kallis tarvittavan jalometallin takia. [79]

PSA-menetelmässä reformerin tuotekaasu ohjataan korkeapaineiseen säiliöön, joka sisältää adsorbointimateriaalia. Kaasuseoksesta ensisijaisesti vetykaasu adsorboituu materiaaliin. Tietyn ajan kuluttua syöttökaasu siirretään toiseen säiliöön ja ensimmäisen säiliön paine lasketaan. Paineen laskiessa vety palautuu adsorbointimateriaalista ja puhdas vety voidaan ottaa talteen. PSA-menetelmää käytetään öljynjalostukseen ja ammoniakkin tuotantoon käytetyn vedyn puhdistamiseksi. [79]

Kaatopaikkakaasun käyttäminen vedyntuotannossa olisi pioneerihanke. Jotta hanke voisi toteutua, mukana pitäisi olla alan yrityksiä ja tutkimusyhteistyötä. Kaatopaikkakaasun reformoinnin valinta vedyn tuotantotavaksi sisältää paljon epävarmuustekijöitä sekä kokonaiskustannusten että vedyn laadun suhteen. Toisaalta se olisi innovatiivinen hanke, joka voisi synnyttää teknologisia edelläkävijäratkaisuja.

7.3 Tankkausaseman sijoitus

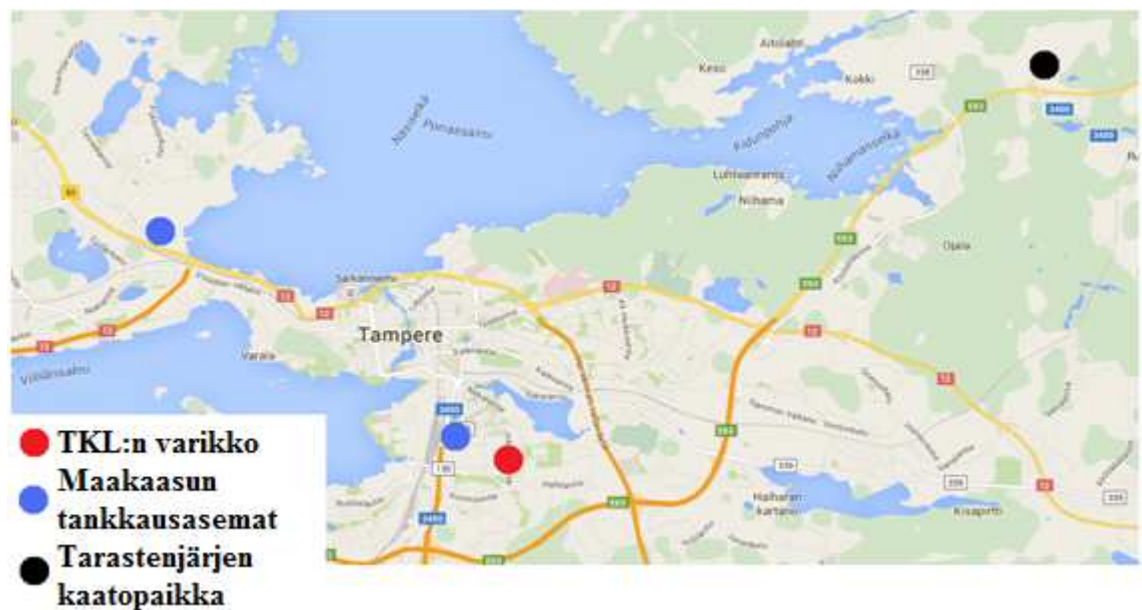
Vedyn tuotantotapa vaikuttaa tankkausaseman sijaintiin. Jos tankkausasemalla käytetty vety tuotetaan elektrolyysillä tai tuodaan paikan päälle suuremmasta tuotantolaitoksesta, tankkausasema voi sijaita linja-autovarikolla. Linja-autovarikolla sijaitsevan tankkausaseman etuna on se, että linja-auton tankkaus ja muu huolto voidaan tehdä samassa paikassa. Kun tankkaus tapahtuu varikolla, linja-auton reittiä ei tarvitse suunnitella tankkausaseman mukaan. Tämä antaa polttokennolinja-auton reitin suunnittelulle saman vapauden kuin diesellinja-autoillakin. Varikolle sijoitettavan tankkausaseman ongelmana on se, että sille täytyy löytää varikolta tila. Elektrolyysiasema voi viedä satojen neliömetrien tilan. Muualta tuodun vedyn tankkausasema on kooltaan tyypillisesti joitakin kymmeniä neliömetrejä. [66]

Tankkausasema voi olla myös julkinen. Tällöin tankkausasemalla voi tankata sekä linja-autot että henkilöautot. Tankkausasemalla täytyy tällöin olla mahdollisuus tankata 350 bar paineessa linja-autoille ja 700 bar paineessa henkilöautoille. Yhteisasema sopii tilanteeseen, jossa polttokennohenkilöautoja ja linja-autoja on hyvin vähän. Polttokennoliikenteen kasvaessa linja-autot voivat muodostaa asemalle ruuhkaa. Henkilöautojen tankkauksen kannalta sopiva sijoituspaikka alkuvaiheen tankkausasemalle voisi olla esimerkiksi suurten kauppakeskittymien lähellä, jolloin tankkaus tapahtuu muun asioinnin yhteydessä. Maakaasun tankkausasemat ovat sijoitettu tämän periaatteen mukaisesti.

Tampereen kaksi maakaasun tankkausasemaa sijaitsee Lielahdessa ja Nekalassa. Jos tankkausasema sijaitsee kauppakeskittymän lähellä, polttokennolinja-autovuoro voisi kulkea esimerkiksi kauppakeskittymän ja keskustan väliä.

Jos vety tuotetaan Tarastejärvellä kaatopaikkakaasuista, on tankkausaseman järkevä sijainti samassa yhteydessä. Tarastenjärven jätteenkäsittelykeskus sijaitsee noin 15 km Tampereelta Jyväskylän suuntaan. Tarastejärven lähellä on Nurmen ja Sorilan asutusalueet. Tällä hetkellä Nurmen ja Sorilan alueella asuu noin 700 henkilöä. Lisäksi alueella on kesämökkejä. Tampereen kaupunginvaltuusto on hyväksynyt osayleiskaavaehdotuksen Nurmi-Sorilan alueelle. Osayleiskaavassa osoitetaan uusia asuntoja noin 13 000 asukkaalle. Tarastejärvelle sijoittuva vetytankkausasema voisi palvella Nurmi-Sorilan ja kaupungin keskustan välistä liikennettä. Tarastejärven ongelmana on se, että se sijaitsee kaukana TKL:n varikosta, joten linja-auton tankkaus ja huolto tapahtuu eri paikoissa. [80]

Kuvassa 7.1 on esitetty esimerkkejä tankkausaseman mahdollisia sijaintipaikkoja Tampereella. Jos vety tuotetaan elektrolyysillä tai tuodaan isommasta tuotantolaitoksesta, tankkausasema voi sijaita muuallakin kuin kuvan esittämässä paikoissa.



Kuva 7.1 Tankkausaseman mahdollisia sijaintipaikkoja

Eurooppalaisissa polttokennolinja-autoprojekteissa liikennöitsijät ovat pitäneet parhaimpana tankkausmallia, jossa ulkopuolinen toimittaja toimittaa vedyn varikolla olevalle tankkausasemalle. Tämä malli muistuttaa eniten nykyistä diesellinja-autojen tankkausta.

7.4 Varikko

Polttokennolinja-auton käyttöön ottaminen vaatii pieniä muutoksia linja-autovarikolla. Ihminen ei voi havaita vetyä, koska se on hajuton ja väritön kaasu. Linja-autovarikolla pitääkin olla vetysensorit, jotka havaitsevat mahdollisen vetyvuodon. Koska vety kohoaa suljetussa tilassa ylöspäin, on vetysensorien sijaettava varikon katossa. Vetyvuodon sattuessa sensorit varoittavat siitä äänellä ja visuaalisesti. Varoitusjärjestelmän pitää olla yhteydessä ilmastointiin tai savunpoistojärjestelmään. Hälytyksen sattuessa pitää olla voimakas ilmanvaihto päällä. Ilmanvaihtojärjestelmän pitää olla katon korkeimmassa kohdassa. Hälytyksen sattuessa sähköisten laitteiden on kytkeydyttävä pois päältä lukuun ottamatta turvalaitteita ja poistumisvaloja. [81]

Polttokennolinja-auton tankit sijaitsevat auton katolla. Katolla voi sijaita myös polttokennojärjestelmä, akkuja tai korkeajännitejärjestelmiä. Varikolla pitää olla mahdollisuus työskennellä linja-auton katolla. Katolla työskentely voidaan tehdä yksinkertaisimmin liikuteltavan työtason päältä. Polttokennojärjestelmään voi jäädä vettä, jonka jäätyminen pitää estää. Tämän takia linja-autolle pitää olla lämmitysmahdollisuus yöksi. [74]

8. YHTEENVETO

Liikenne on edelleen erittäin riippuvainen öljytuotteista ja se on merkittävä kasvihuonepäästöjen aiheuttaja. Tiheästi asutuilla alueilla liikenteellä on suuri vaikutus paikalliseen melutasoon ja ilman puhtauteen. Liikenteessä ja erityisesti kaupunkiliikenteessä on alettava suosimaan vaihtoehtoisia käyttövoimajärjestelmiä ja polttoaineita, jotta öljyriippuvuutta ja kasvihuonekaasupäästöjä saadaan vähennettyä. Julkisen liikenteen ajoneuvot soveltuvat hyvin uusien teknologioiden testialustoiksi, koska niiden tankkaus ja huolto tapahtuu yleensä keskitetysti ja ne voivat nopeuttaa uusien teknologioiden kaupallistumista.

Polttokennot ovat yksi teknologia, jolla liikenteen paikallisia ilmansaasteita ja meluhaittoja saadaan vähennettyä merkittävästi. Polttokennolla saadaan polttoaineen kemiallinen energia muutettua sähköenergiaksi. Polttokennoajoneuvot ovatkin sähköajoneuvoja, joissa sähköenergia tuotetaan ajon aikana. Perinteisissä sähköajoneuvoissa sähköenergia on varastoitu akkuihin. Polttokennoajoneuvot muistuttavat käyttötavaltaan enemmän bensiini- ja dieselajoneuvoja kuin perinteiset sähköajoneuvot. Lataamisen sijasta polttokennoajoneuvo tankataan ja tankkaus kestää ajoneuvon koosta riippuen muutamasta minuutista enintään 20 minuuttia.

Polttokennoajoneuvoissa käytetyin kennotyyppi on kiinteä polymeeripolttokenno. Kiinteillä polymeeripolttokennoilla on ajoneuvosovelluksiin sopiva toimintalämpötila, ne ovat kompaktin kokoisia ja niillä on lyhyt käynnistysaika. PEM-kennoilla on myös paljon muita sovelluskohteita ja siksi matalan lämpötilan polttokennojen tutkimus- ja kehitystyö on viimeaikoina keskittynyt PEM-kennoihin. Tutkimus- ja kehitystyön tuloksena PEM-kennojen hinnat ovat alentuneet ja kestävyys on parantunut merkittävästi viime vuosien aikana.

Polttokennolinja-auton tärkeimmät komponentit ovat vetytankki, polttokennojärjestelmä, energiavarasto sekä sähkömoottori. Energiavarasto ja sähkömoottori ovat samoja komponentteja kuin muissakin sähkölinja-autoissa. Synergia näiden teknologioiden välillä voi tuoda hyötyä teknisen kehityksen ja tuotantokustannusten osalta. Polttokennolinja-autot ovat vielä merkittävästi kalliimpia kuin diesellinja-autot. Polttokennojärjestelmä ja vetytankki muodostavat noin puolet linja-auton tuotantokustannuksista. Polttokenno- ja vetyteknologia ovat vasta kaupallistumisen alussa ja polttokennolinja-autojenkin hintojen arvioidaan pienenevän tuotantomäärien kasvaessa.

Polttokennolinja-autojen hankintahinta saattaa tulevaisuudessakin pysyä korkeampana kuin vastaavan diesellinja-auton hinta. Polttokennolinja-autojen eliniänikaisten koko-

naiskustannusten arvioidaan tulevan samalle tasolle diesellinja-autojen kanssa vuoteen 2030 mennessä. Kokonaiskustannuksiin vaikuttaa erityisesti polttoaineen hinta. Polttokennolinja-autojen taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttaa myös poliittiset päätökset. Jos vähäpäästöisiä kulkuneuvoja päätetään tukea voimakkaasti, polttokennolinja-autojen taloudellinen kannattavuus suhteessa diesellinja-autoihin paranee. Toisaalta jos vetyä päätetään verottaa voimakkaasti, polttokennolinja-autojen käyttökustannukset nousevat. Vetyä voitaisiin verottaa esimerkiksi sen tuottamisesta syntyvien hiilidioksidipäästöjen perusteella.

Polttokennoajoneuvot käyttävät polttoaineenaan vetyä. Vedyn saatavuuden varmistaminen on yksi tärkeimmistä asioista polttokennoajoneuvojen yleistymisen kannalta. Vety esiintyy luonnossa yhdisteinä, joista sitä pitää valmistaa. Vedyn valmistus kuluttaa energiaa ja siitä voi syntyä suuret kasvihuonepäästöt. Yleisin ja edullisin tapa valmistaa vetyä on maakaasun höyryreformointi. Maakaasun höyryreformoinnista syntyy kuitenkin hiilidioksidipäästöjä. Vetyä voidaan tuottaa uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön avulla veden elektrolyysistä, mikä on myös ympäristöystävällisin vedyn tuotantotapa. Elektrolyysillä tuotettu vety on myös hyvin puhdasta. Elektrolyysimenetelmä on kuitenkin usein kallein tapa tuottaa vetyä. Sopivaa vedyn tuotantotapaa valittaessa täytyy miettiä, halutaanko vety tuottaa mahdollisimman edullisesti, mikä voi nopeuttaa ajoneuvojen yleistymistä vai halutaanko vety tuottaa mahdollisimman ympäristöystävällisesti.

Vetykäyttöisiä ajoneuvoja varten täytyy rakentaa tankkausasemia. Henkilöautoja varten tankkausverkoston täytyy olla kattava, jotta kuluttajat kokevat polttokennoauton mielekkääksi ajoneuvovaihtoehdoksi. Kaupunkilinja-autot tankataan keskitetysti yhdessä paikassa, joten niitä varten riittää yhden vetytankkauspisteen järjestäminen. Linja-autoja varten rakennettavat tankkauspisteet voivat toimia laajemman vetyinfrastruktuurin alkuunpanijana. Tankkausasema on mahdollista toteuttaa teknisesti niin, että siellä voidaan tankata sekä henkilöautoja että linja-autoja.

Vety eroaa ominaisuuksiltaan nykyisin käytössä olevista polttoaineista. Vety on ilmaa kevyempi, herkästi syttyvä kaasu. Vedyn käytön turvallisuus täytyy varmistaa sekä linja-autossa että tankkausasemilla. Vedyn turvallinen käyttö pyritään varmistamaan EU-direktiiveillä ja Suomen lainsäädännöllä. Lisäksi erilaisilla standardeilla ja ohjeilla pyritään varmistamaan polttokennoajoneuvojen ja vedyn tankkauksen turvallisuus, tuotteiden laatu ja laitteistojen tekninen yhteensopivuus. Polttokennoajoneuvot ovat uusi teknologia, joten niihin liittyvän lainsäädäntö ja standardit voivat muuttua ja lisääntyä polttokennoajoneuvojen yleistyessä.

Useat eurooppalaiset kaupungit haluavat rajoittaa liikennepäästöjä ja ovat siksi mukana erilaisissa polttokennolinja-autoprojekteissa. Suomessa ei ole käytössä yhtään polttokennolinja-autoa, mutta varsinaisia esteitä niiden käyttöönotolle ei ole. Tampereella polttokennolinja-auton tarvitsema vety voitaisiin tuottaa veden elektrolyysillä tai kaato-

paikkakaasusta höyryreformilla. Vety voitaisiin myös ostaa kaupallisilta toimijoilta. Kaatopaikkakaasusta ei tiettävästi ole missään valmistettu henkilö- tai linja-autoihin soveltuvaa vetyä. Kaatopaikkakaasun käyttäminen olisi siis pioneerihanke, jonka toteutuminen vaatii tarkempaa tutkimusta taloudellisen kannattavuuden ja teknisten ratkaisujen osalta.

Eurooppalaisten polttokennolinja-autoprojektien perusteella liikennöitsijät pitävät parhaana mallia, jossa ulkopuolinen toimittaja toimittaa vedyn ja ylläpitää tankkauslaitteistoa, koska se muistuttaa eniten nykyistä diesellinja-autojen tankkausmallia. Muut vedyn tuotanto- ja tankkaustavat vaativat henkilökunnan erityistä perehdytystä ja motivointia uuteen tekniikkaan ja toimintamalleihin. Joka tapauksessa polttokennolinja-autoprojektiin kuuluu henkilökunnan ohjeistaminen ja koulutus sekä tiivis yhteistyö projektin alusta alkaen sekä kaupallisten toimijoiden että viranomaisten kanssa.

LÄHTEET

- [1] Valkoinen kirja: Yhtenäistä Euroopan liikennealuetta koskeva etenemissuunnitelma – Kohti kilpailukykyistä ja resurssitehokasta liikennejärjestelmää, KOM(2011) 144 lopullinen, Euroopan komissio, Bryssel, Belgia, 2011, 33 s. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:FI:PDF>.
- [2] P. Kauranen, J. Solin, K. Törrönen, J. Koivula, J. Laurikko, Vetytiemä - Vetyenergian mahdollisuudet Suomelle, VTT-R-02257-13, 2013, 1-88 s. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://www.vtt.fi/Documents/2013_VTT-R-02257-13.pdf.
- [3] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2014/94/EU vaihtoehtoisten polttoainoiden infrastruktuurin käyttöönotosta, 2014/94/EU, 2014. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?qid=1457966394066&uri=CELEX:32014L0094>.
- [4] Vaihtoehtoisten käyttövoimien jakeluverkko – ehdotus kansalliseksi suunnitelmaksi vuoteen 2020/2030, Julkaisuja-sarja 4 / 2015, Liikenne ja viestintäministeriö / Liikenteen ympäristöasiain neuvottelukunta, 2015, 1-40 s. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.lvm.fi/documents/20181/514467/Julkaisuja+4-2015/f6e077d6-c67b-4af2-a022-bfbc1a4ad68c?version=1.0>.
- [5] A. Emadi, Y. Gao, M. Ehsan, Fuel Cells, in: CRC Press, 2009, pp. 433-458.
- [6] G. Hoogers, Fuel Cells, in: R.C. Dorf (ed.), The Engineering Handbook, Second Edition, CRC Press, 2004.
- [7] J.O. Jensen, Q. Li, Fuel Cells, in: A. Léon (ed.), Hydrogen Technology: Mobile and Portable Applications, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008, pp. 151-184.
- [8] F. Barbir, PEM fuel cells : theory and practice, 2nd ed. ed. Elsevier/Academic Press, Amsterdam, cop. 2013.
- [9] P. Corbo, F. Migliardini, O. Veneri, Hydrogen Fuel Cells for Road Vehicles, Springer London, 2011, 246 p.
- [10] A. Emadi, Y. Gao, M. Ehsan, Fuel Cell Hybrid Electric Drive Train Design, in: Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory, and Design, Second Edition , 2. ed., CRC Press, 2009, pp. 459-469.
- [11] H2Mobility: Hydrogen Vehicles, TÜV SÜD Industrie Service GmbH, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.netinform.net/H2/H2Mobility/Default.aspx?CATID=1&CompanyID=0>.
- [12] M. Schade, Das kostet das erste Brennstoffzellenauto, 24.3.2015, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.autobild.de/artikel/hyundai-ix35-fuelcell-preis-5685320.html>.

- [13] Not afraid of the cold: Toyota Mirai launches in Sweden and Norway this summer, Toyota, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://newsroom.toyota.eu/pressrelease/4959//afraid-cold-toyota-mirai-launches-sweden-norway-summer>.
- [14] 2016 Mirai Product Information, Toyota, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <https://pressroom.toyota.com/releases/2016+toyota+mirai+fuel+cell+product.download>.
- [15] Technische Daten, Hyundai, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.hyundai.at/hyundai.at/files/31/314f058e-8af0-4b60-a423-08dda79dee4e.pdf>.
- [16] Case Study – Fuel Cell Zero-Emission Transit for the City of London, Ballard Power Systems, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://www.ballard.com/files/PDF/Bus/TfL_Case_Study_Jan_2016.pdf.
- [17] Draft Technology Assessment: Medium- and Heavy-Duty Fuel Cell Electric Vehicles, California Environmental Protection Agency, Air Resources Board, California, USA, 2015, Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://www.arb.ca.gov/msprog/tech/techreport/fc_tech_report.pdf.
- [18] Demonstration of 1st European SOFC Truck APU, DESTA, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.desta-project.eu/desta-project/>.
- [19] Early Markets: Fuel Cells for Material Handling Equipment, DOE/EE-0751, U.S Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy, 2014, Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f9/early_markets_mhe_fact_sheet.pdf.
- [20] H. Landinger, Periodic Report Summary 1 - HYLIFT-EUROPE (HyLIFT-EUROPE - Large scale demonstration of fuel cell powered material handling vehicles), European Union, 2015, Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://cordis.europa.eu/result/rcn/164416_en.html.
- [21] Toyota polttokennokäyttöinen vastapainotrukki, Toyota Material Handling Finland, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://www.toyota-forklifts.fi/sitecollectiondocuments/pdf%20files/fuelcell_leaflet.pdf.
- [22] Polttokennot 2007-2013, Tekes, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): https://www.tekes.fi/globalassets/global/ohjelmat-ja-palvelut/ohjelmat/polttokennot/aineistot/tekes_polttokennot_ohjelma.pdf.
- [23] M. Pein, Fuel cell ideal for demanding maritime applications, Vol. 2012, No. 6, 2012, pp. 14-15.
- [24] K. Hammou, One hundred passengers and zero emissions, Hamburg, Germany, 2010, Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=Zemships_Newsletter4_EN.pdf.

[25] Facts about FellowSHIP and the Viking Lady: Systanable energy generation for marine use, FellowSHIP, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://vikinglady.no/wp-content/uploads/2009/12/Facts-FellowSHIP-and-Viking-Lady2.pdf>.

[26] J. Seppälä, Wärtsilä asensi polttokennon laivaan, 2010, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/metalli/2010-06-11/W%C3%A4rtsil%C3%A4-asensi-polttokennon-laivaan-3292142.html>.

[27] About us, Convion Ltd., verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://convion.fi/about-us/>.

[28] e4ships - Fuel cells in marine applicatios, HySolutions, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://www.hysolutions-hamburg.de/uploads/media/e4s_Flyer_Layout_eng_2014-08-15_01.pdf.

[29] Case Study: Taiwan Hydrogen Fuel Cell Scooter Fleet Demonstration, Break-through Technologies Institute, Washington, USA, 2012, Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.fuelcells.org/pdfs/TaiwanScooterCaseStudy.pdf>.

[30] T. Koehler, A green machine, 2008, Saatavissa (viitattu 11.5.2016) : http://www.boeing.com/news/frontiers/archive/2008/may/ts_sf04.pdf.

[31] Electricity through "cold" combustion, Airbus S.A.S, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.airbus.com/innovation/future-by-airbus/future-energy-sources/fuel-cells/>.

[32] International Hydrail Coference, Appalachian State University, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://hydrail.org/>.

[33] Asetukset, direktiivit ja muut säädökset, Euroopan unioni, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://europa.eu/eu-law/decision-making/legal-acts/index_fi.htm.

[34] Hydrogen Data Book, U.S Department of Energy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://hydrogen.pnl.gov/hydrogen-data/hydrogen-properties>.

[35] Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet -turvallisuusohjeet (OVA-ohjeet) , Työterveyslaitos, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.ttl.fi/ova/>.

[36] Hydrogen Compared with Other Fuels, H2 tools, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <https://h2tools.org/bestpractices/h2properties>.

[37] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2007/46/EY puitteiden luomisesta moottoriajoneuvojen ja niiden perävaunujen sekä tällaisiin ajoneuvoihin tarkoitettujen järjestelmien, osien ja erillisten teknisten yksiköiden hyväksymiselle (Puitedirektiivi), 2007/46/EY, 2007. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?qid=1457015575766&uri=CELEX:32007L0046>.

[38] Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EY) N:o 79/2009, vetykäyttöisten moottoriajoneuvojen tyyppihyväksynnästä, 79, 2009. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:32009R0079&qid=1457014453688>.

[39] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 94/9/EY räjähdyksivaarallisissa tiloissa käytettäviksi tarkoitettuja laitteita ja suojajärjestelmiä koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön lähentämisestä, 94/9/EY, 1994. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?qid=1456990228905&uri=CELEX:31994L0009>.

[40] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 1999/92/EY vähimmäisvaatimuksista räjähdyskelpoisten ilmaseosten aiheuttamalle vaaralle mahdollisesti alttiiksi joutuvien työntekijöiden turvallisuuden ja terveyden suojelun parantamiseksi, 1999/92/EY, 1999. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?qid=1456991717390&uri=CELEX:31999L0092>;

[41] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2012/18/EU vaarallisista aineista aiheutuvien suuronnettomuusvaarojen torjunnasta, 2012/18/EU, 2012. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?qid=1456988641091&uri=CELEX:32012L0018>.

[42] Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien käsittelyn ja varastoinnin valvonasta 21.5.2015/685, 685, 2015. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://plus.edilex.fi/tukes/fi/lainsaadanto/20150685>.

[43] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 97/23/EY painelaitteita koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön lähentämisestä, 97/23/EY, 1997. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:31997L0023&qid=1456996836888&from=FI>.

[44] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/35/EU kuljetettavista painelaitteista, 2010/35/EU, 2010. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?qid=1457001811365&uri=CELEX:32010L0035>.

[45] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/95/EY tietyllä jännitealueella toimivia sähkölaitteita koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön lähentämisestä (kodifioitu toisinto), 2006/95/EY, 2006. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?qid=1457003004619&uri=CELEX:32006L0095>.

[46] Sähköturvallisuuslaki (1996/410), 410, 1996. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1996/19960410?search%5Btype%5D=pika&search%5Bpika%5D=sähköturvallisuuslaki>.

[47] International Organisation for Standardisation (ISO), International Organisation for Standardisation (ISO), verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.iso.org/iso/home.htm>.

[48] Welcome to the IEC - International Electrotechnical Commission, International Electrotechnical Commission (IEC), verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.iec.ch/index.htm>.

- [49] SAE International, SAE International, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.sae.org>.
- [50] EIGA : European Industrial Gases Association - AISBL, European Industrial Gas Association (EIGA), verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <https://www.eiga.eu/index.php?id=291>.
- [51] H. Ammermann, Y. Ruf, S. Lange, D. Fundulea, A. Martin, Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe A Study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Roland Berger GmbH, München, Germany, 2015, 52 p. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/150909_FINAL_Bus_Study_Report_OUT_0.PDF.
- [52] N. Sirosh, A. Niedzwiecki, Development of Storage Tanks, in: A. Léon (ed.), Hydrogen Technology: Mobile and Portable Applications, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008, pp. 291-310.
- [53] Urban buses: alternative powertrains for Europe A fact-based analysis of the role of diesel hybrid, hydrogen fuel cell, trolley and battery electric powertrains, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), 2012, 45 p. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/20121029%20Urban%20buses%20alternative%20powertrains%20for%20Europe%20-%20Final%20report_0_0.pdf.
- [54] P.J. Grbovic, Wiley - IEEE : Ultra-Capacitors in Power Conversion Systems : Analysis, Modeling and Design in Theory and Practice (1), Wiley-IEEE Press, Somerset, GB, 2013.
- [55] CHIC - Project presentation, CHIC-project eu, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://chic-project.eu/wp-content/uploads/2016/03/CHIC-Emerging-Conclusions__short_Feb2016.pdf.
- [56] High V.LO-City, High V.LO-City, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016) (accessed 1/4): <http://highvlocity.eu>.
- [57] H2 Aberdeen, City Promotions, Aberdeen City Council, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://aberdeeninvestlivevisit.co.uk/Invest/Aberdeens-Economy/City-Projects/H2-Aberdeen/H2-Aberdeen.aspx>.
- [58] 3Emotion, 3emotion, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.3emotion.eu>.
- [59] L. Eudy, M. Post, C. Gikakis, Fuel Cell Buses in U.S. Transit Fleets: Current Status 2015, NREL/TP-5400-64974, National Renewable Energy Laboratory, 2015, 1-32 p. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/fc_buses_2015_status.pdf.
- [60] HySUT The Research Association of Hydrogen Supply/Utilization Technology, The Research Association of Hydrogen Supply/Utilization Technology, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://hysut.or.jp/en/pdf/pamph01.pdf>.

[61] R. Guerrero-Lemus, M.J. Martínez-Duart, Hydrogen Production, in: Renewable Energies and CO₂, Volume 3 of the series Lecture Notes in Energy pp 89-111 ed., - Springer London, 2012 .

[62] Kemira Chemicals Oy, Leppäkosken Sähkö konserni, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): www.leppakoski.fi/tietoa-meista/asiakasreferensseja/energiaratkaisut/kemirachemicals.

[63] G. Maisonnier, J. Perrin, R. Steinberger-Wilckens, S.C. Trümper, Hydrogen Infrastructure Atlas and Industrial Excess Hydrogen Analysis. Part II: Industrial surplus hydrogen markets and production. Roads2HyCom –project deliverable 2.1 and 2.1a. R2H2006PU.1, Roads2HyCom, Oldenburg, Germany, 2007, 1-86 p. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://www.ika.rwth-aachen.de/r2h/images/d/df/Roads2HyCom_R2H2006PU_-_%28Part_II%29_-_Industrial_Surplus_H2.pdf.

[64] Technology Roadmap Hydrogen an Fuel Cells, International Energy Agency, Ranska, 2015, Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>.

[65] Die Rolle von Wasserstoff in der Energiewende, e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg Cluster Brennstoffzelle BW c/o e-mobil BW GmbH Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), Baden-Württemberg, Deutschland, 2014, 1-75 p. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://www.netinform.net/H2/Recherche/HM/pdf/Studie_Wasserstoff-in-der-Energiewende.pdf.

[66] K. Stolzenburg, S. Whitehouse, N. Whitehouse, Experiences with the implementation of infrastructures for hydrogen refuelling and lessons for future installations, D3.7, Clean Hydrogen In European Cities, 2014, 1-42 p. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://chic-project.eu/wp-content/uploads/2015/04/CHIC_Implementation-of-infrastructures-for-hydrogen-refuelling-and-lessons-for-future-installations.pdf.

[67] M. Nissilä, J. Sarsama, Polttokennosovellusten ja vetytankkauksen turvallisuuden varmistaminen Säädöksiä ja standardeja, VTT Technology 112, VTT, Espoo, Suomi, 2013, 1-56 p. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://www.tekes.fi/globalassets/global/ohjelmat-ja-palvelut/ohjelmat/polttokennot/aineistot/polttokennosovellusten_ja_vetytankkauksen_turvallisuuden_varmistaminen.pdf.

[68] Hydrogen Filling Stations Worldwide, TÜV SÜD, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.netinform.net/H2/H2Stations/H2Stations.aspx?Continent=EU&StationID=-1>.

- [69] Kertomus vuoden 2014 toiminnasta, Vuosikertomus 2014, Tampereen joukkoliikenne, Kaupunkiympäristön kehittäminen, Tampereen Kaupunki, Tampere, 2015, 1-27 p. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://joukkoliikenne.tampere.fi/media/materiaalipankki/tutkimukset-ja-vuosikertomukset/vuosikertomus2014_nettiin.pdf.
- [70] Tampereen joukkoliikenne - Linjat ja liikennöitsijät, Tampereen kaupunki, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016) : <http://joukkoliikenne.tampere.fi/ohjeita-ja-tietoa/matkustajan-opas/linjat-ja-liikennöitsijat.html>.
- [71] Tampereen Kaupunkiliikenne- Linja-auto kalusto, Tampereen Kaupunkiliikenne Liikelaitos /Tampereen kaupunki, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.tampere.fi/tkl/kalusto.html>.
- [72] E. Panula-Ontto, Horisontti 2020-hankkeiden valmistelu, Tekes, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.tekes.fi/rahoitus/horisontti2020-hankkeiden-valmistelu/>.
- [73] B. Madden, R. Zaetta, S. Skiker, Guidelines for delivering fuel cell bus projects, 4.8c, Clean Hydrogen in European Cities, 2016, 1-37 p. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://chic-project.eu/wp-content/uploads/2016/04/CHIC_Guidelines-for-delivering-fuel-cell-bus-projects-D4.8c.pdf.
- [74] A. Lozanovski, N. Ko, Analysis of investments in workshops for fuel cell buses and hydrogen refuelling stations, 256848, Clean Hydrogen In European Cities, Stuttgart, Germany, 2015, 1-43 p. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): http://chic-project.eu/wp-content/uploads/2015/07/CHIC-D3_11_final.pdf.
- [75] P. Väisänen, J. Salmenoja, Biokaasun muodostuminen ja sen hallittu käsittely kaatopaikoilla, Biokaasuyhdistys, 2010, 1-27 s. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.biokaasuyhdistys.net/docs/kaatgas.pdf>.
- [76] Jätteenkäsittelykeskuksissa kerätään kaatopaikkakaasut talteen, Pirkanmaan Jätehuolto Oy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.pirkanmaan-jatehuolto.fi/Yhtio/Kaasunkeraus>.
- [77] Wärtsilän ainutlaatuinen polttokennoyksikkö saavuttanut erinomaisia tuloksia, Wärtsilä oy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://www.wartsila.com/fi/media-fi/uutinen/22-02-2010-wartsilan-ainutlaatuinen-polttokennoyksikko-saavuttanut-erinomaisia-tuloksia>.
- [78] EERE Success Story—One Man's Trash, Another Man's Fuel: BMW Plant Converts Landfill Gas to Hydrogen Fuel, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.5.2016): <http://energy.gov/eere/success-stories/articles/eere-success-story-one-mans-trash-another-mans-fuel-bmw-plant-converts>.
- [79] J. Larminie, J. Lowry, Electric Vehicle Technology Explained (2), Wiley, Somerset, GB, 2012.
- [80] Nurmi-Sorilan osayleiskaava, Tampere, 2015, ss. 1-5.

[81] Wasserstoffsicherheit in Werkstätten, BGI 5108, BG Bahnen, Hamburg, Deutschland, 2009, 1-30 p. Saatavissa (viitattu 11.5.2016):
<http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bgi-5108.pdf>.